



TITLE:

PCM通信方式の通話品質に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

橋本, 清

CITATION:

橋本, 清. PCM通信方式の通話品質に関する研究. 京都大学, 1970, 工学博士

ISSUE DATE:

1970-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r1698>

RIGHT:

PCM 通信方式の通話品質に関する研究

橋 本 清

DOC

1970

9

電気系

前田 忠一 調査委員 殿

3月 18日 研究科会議において調査委員に決定せられた学位論文をお届けいたします。

なお、本論文の審査報告が付議される研究科会議の前日までにお返し願います。

昭和 年 月 日
昭和四拾五年参月廿五日

工学部第二教務掛

稿本

目 次

オ1章 序 論

1.1 PCM通信方式の概論	1
1.2 PCM通信方式の品質劣化要因	6
1.3 電話通話系の通話品質	8

オ2章 実験装置

2.1 日本主通話標準装置	11
2.2 PCMモデル装置	16
2.3 PCMレベル分離装置	18
2.4 PCM誤符号発生装置	21
2.5 24通話路PCM端局装置	22

オ3章 PCM基本パラメータの品質評価

3.1 概論	23
3.2 明りょう度試験法	25
3.3 等価雑音の誘導	29
3.4 信号振幅量子化の影響	32
3.5 信号入力レベルの影響	36
3.6 圧伸特性の影響	40
3.7 過負荷ひずみの影響	42
3.8 信号振幅部分量子化の影響	45
3.9 信号標本化周波数の影響	48
3.10 圧伸誤整合の影響	49
3.11 結論	71

オ4章 商用電話系の諸要因の品質評価

4.1 概論	73
4.2 線路雑音の影響	75
4.3 符号誤りの影響	78
4.4 マリンク接続の影響	80
4.5 結論	81

オ5章 PCM系の波形ひずみスペクトルを考慮した明りょう度予測

5.1 概論	82
5.2 量子化音声の電カスペクトルの計算式	84
5.3 日本語音声の波形ひずみスペクトルの計算	93
5.4 日本語音声の波形ひずみスペクトルの特徴	94
5.5 波形ひずみスペクトルの等価雑音とその予測	100
5.6 結論	103

オ6章 PCM系の音韻異聴による評価

6.1 概論	104
6.2 異聴表の作成	105
6.3 信号認識モデルと音韻異聴	107
6.4 PCM系の母音異聴評価	112
6.5 PCM系の子音異聴評価	116
6.6 結論	125

オ7章 PCM系の各種通話品質尺度による評価の相互比較

7.1 概論	126
7.2 種々の通話品質尺度	126
7.3 実験条件	129
7.4 信号振幅量子化ビット数の影響	129
7.5 信号入力レベルの影響	131
7.6 圧伸特性の影響	133
7.7 雑音の影響	135
7.8 尺度間の相互比較	138
7.9 各尺度等価雑音の定量的表現	144
7.10 結論	153

オ8章 電話伝送基準から見たPCM通信方式の通話品質

8.1 概論	156
8.2 電話伝送基準	156
8.3 明りょう度等価雑音と品質劣化量	158
8.4 各種通話品質尺度による品質劣化量	162
8.5 結論	169

オ9章 結論

結論本文	170
謝辞	180
文献	181

付 録

付録1 母音異聴表	185
付録2 子音異聴表	191

第1章 序論

1.1 PCM通信方式の概論

PCM (パルス符号変調) 通信方式の原理は 1936 年 音声通信の時刻割多重化に関して PTM (パルス時変調) 方式などの研究とパリで行っていた Alec.H.Reeves によって発明されたといわれる。その後 1948 年に米国ベル電話研究所において電子ビーム符号管などを用いた 96 通話路の試作機が作られたこと⁽¹⁾、また続いて 1949 年に Shannon らによる情報量を用いた研究⁽²⁾が発表されるにおよんで PCM 通信方式は急に世の注目を受けるに至った。それ以来ベル電話研究所をはじめ世界の各所で PCM 方式の研究が進められ、半導体計数回路の発達とあわせて実用化に適した新しい回路技術が生み出されるに至った。中でも 1962—1963 年頃ベル電話研究所で実用化が完成された 24 通話路近距離 PCM 方式 (T-1 方式)⁽³⁾ は重要な意味をもつもので、我国の PCM 方式の実用化の上にも大きな影響を与えた。

我国においては、1951 年頃から日本電信電話公社電気通信研究所において PCM 方式に関する基礎的研究が始められ、それ以来 1960 年代初頭までに同研究所や 2, 3 の製造会社等において各種の方式が開発され基礎技術の積み重ねが行われた。その後、ベル電話研究所の上記 T-1 方式の完成、また電電公社における経済的検討など実用化の機運が高まって来たが、遂に 1963 年、近距離市外伝送路用 24 通話路 PCM 方式の実用化が開始され、1966 年 1 月には商用試験の段階に入った⁽⁴⁾。現在この方式はすでに多くの近距離回線で商用が進んでおり、一方引き続き遠距離回線を対象として超多重無線 PCM をはじめ各種の PCM 方式の開発が進められている。PCM 通信方式の実用化は周波数分割方式から時刻割方式への最初の大がかりな移行のステップと考えられ、今後の通信方式の発達の方角と明確に指し示し

ていると考えられる。

さて、パルス変調方式には PCM 方式以外に (1) PAM (パルス振幅変調) (2) PPM (パルス位置変調) (3) PWM (パルス幅変調) などの各方式があり、図 1.1 にこれらの原理図を示す。これらの各方式は時間標本化という点を除けば、振幅情報についてはアナログ伝送方式である。これに対して PCM (パルス符号変調) 方式は振幅情報

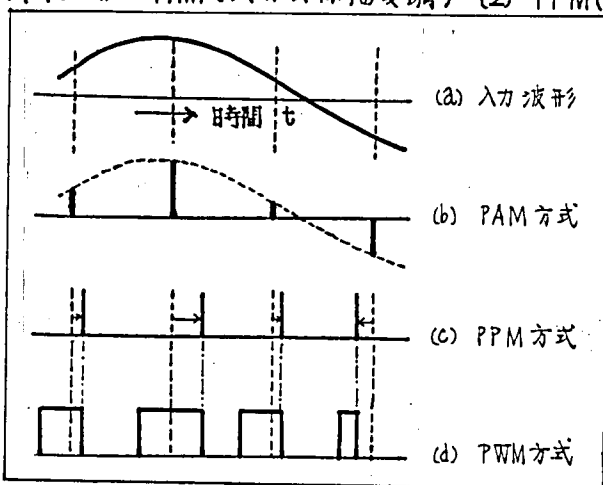


図 1.1 パルス変調方式の諸例

について デジタル伝送を行う方式であって、PAM 方式の標本パルスの代りに、標本パルスの振幅に対応した数値の符号パルスに変換して伝送する。PCM 通信方式の基本的な構成を図 1.2 に示す。

PCM 通信方式において、まず、標本化とは、信号波形から或る等しい時間間隔ごとに信号振幅に比例する高さのパルスを取り出す過程である。連続信号をこのような標本値のみによって伝送・再生できる根拠は Shannon の標本化定理にある。

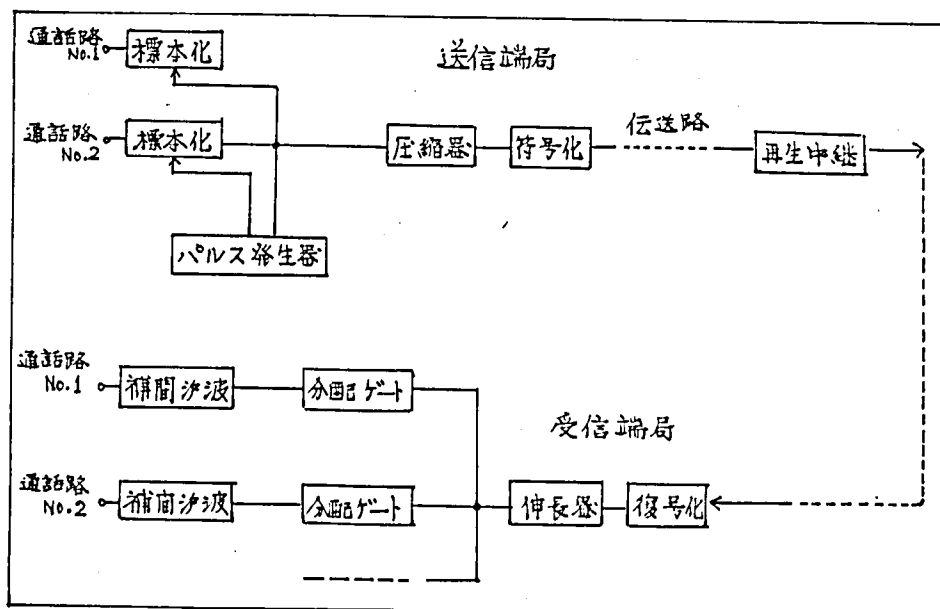


図 1.2 PCM 通信方式の基本構成

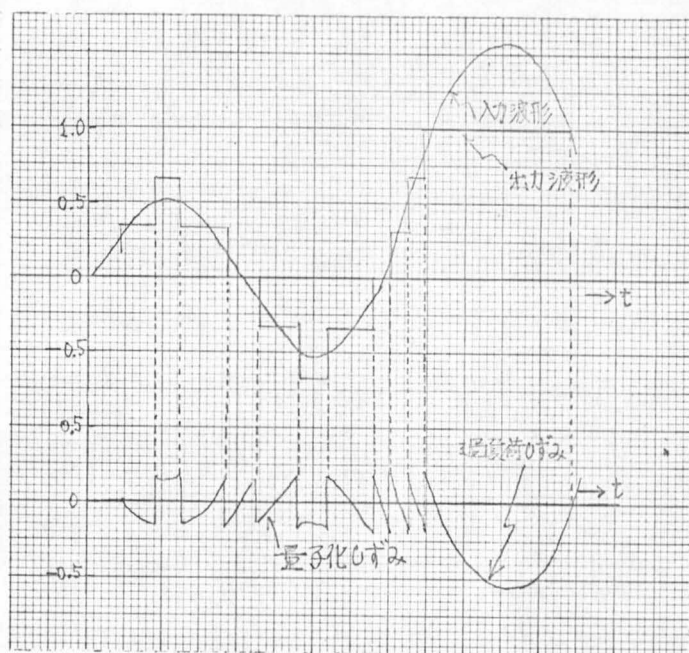
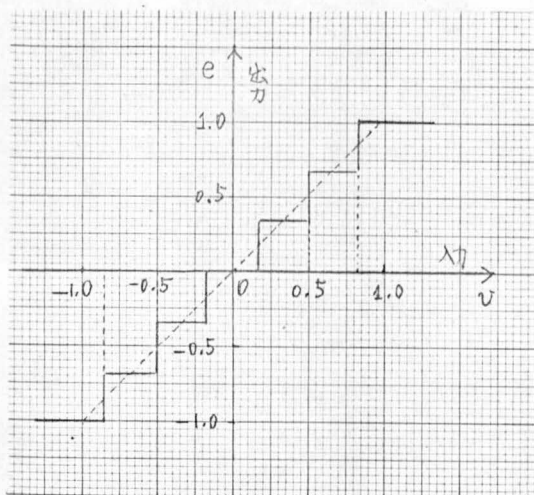
すなわちこの定理は W (Hz) 以上の周波数成分を含まない任意の時間関数 $f(t)$ は

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{n}{2W}\right) \cdot \frac{\sin\{\pi(2Wt-n)\}}{\pi(2Wt-n)} \quad (1.1)$$

によって $1/2W$ 秒置きに離散的時刻における $f(t)$ の標本値 $f(n/2W)$ の系列に標本化関数 $\sin\{\pi(2Wt-n)\}/\pi(2Wt-n)$ を乗ずることによって一義的に決められることを主張する。標本化関数は帯域 W (Hz) を持つ理想低域フィルターのインパルス応答であるから、式 (1.1) は標本パルス列を理想フィルターに通せば原信号が連続信号として再生されることを意味していることになる。現用の商用機では、標本化周波数は 8 kHz が用いられている。

標本化の次の過程が量子化および符号化の過程であって、上記の標本パルスはこの過程において何桁かの桁数から成る 2 進の符号パルスに変換 (符号化) される。符号系も従来種々のものが考案され用いられて来たが、商用機では自然 (普通) 2 進符号が用いられており、0 または 1 の n 個の系列により 0 から $2^n - 1$ の 2^n 個の数と表現させている。従ってたとえば $n=7$ とすれば入力信号の $-V$ から V の間を $2^7 = 128$ の段階に分割し、各段階を 7 桁 2 進数で表現する。この場合、連続信号は $-\infty$ から ∞ まで連続的な値をとり得るのに対し、符号値は有限個の離散値しかとり得ない。従って入力信号は 4 捨 5 入的な丸めの誤差を受けることになる。これが量子化誤差と呼ばれるものであって、波形に現れたものは量子化ひずみと呼ばれる。また、 $-V$ または V 以上の信号は、 $-V$ または V に符号化されるので、この場合には飽和の誤差が生じる。これは過負荷誤差あるいは過負荷ひずみと呼ばれるものである。これらの説明図と図 1.3 に示す。

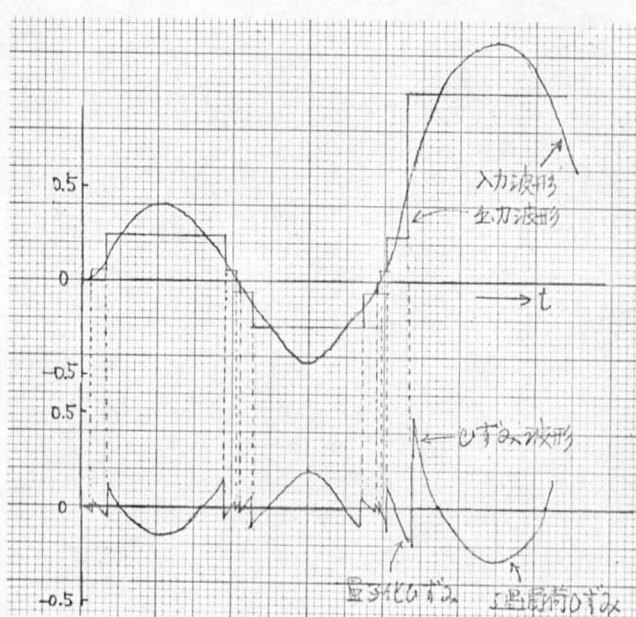
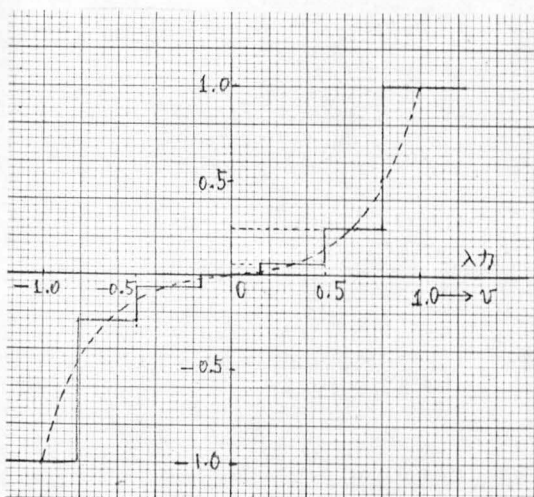
以上の説明においては、量子化段階の幅は一律に等しいと考えて来た。したがって量子化ひずみの量 (電力値) は信号の瞬時振幅に無関係に一定である。しか



(a) 入出力特性

(b) 入出力波形とゆがみ波形

図1.3 均等量子化特性とゆがみ波形



(a) 入出力特性

(b) 入出力波形とゆがみ波形

図1.4 非均等量子化特性とゆがみ波形

し実際の音声信号は、振幅の小さいほど出現確率が高く、逆に振幅の大きいほど出現確率が低いから、量子化段階の幅も振幅の小さいところでは大きく、振幅の大きいところで相対的にあらくすれば有利である。この考えはまた S/D 比^{*}を振幅に無関係に一定にする意味でも合理的と考えられる。これが非線形（あるいは非均等）量子化であって、非線形符号器を使用するか、或いは通常の線形（均等）符号器に図 1.2 に示したような圧伸器を併用することによって達成せられる。非線形量子化の入出力特性とひずみ波形の関係を図 1.4 に示す。商用機では線形符号器に圧伸器を併用する方法が用いられており、圧伸特性は対数形でそのパラメータの値 μ は 100 とされている（オ 3 章 参照）。

註*) 信号電力 S とひずみ電力 D の比で、
信号対ひずみ比とも言う。

多重化が行われる際には、多くの通話路の標本パルスおよび符号パルスが時間的に serial な形に並ぶので、符号化の速度は通話路数に比例したものになる。24 通話路の商用機では符号化のクロックパルスは 1.544 MHz と高い周波数となっている。

PCM 方式の利点は、符号パルスが 2 値であるので、ひずみや雑音の多い劣悪な伝送路でも再生中継が誤り少く行える点にある。このため原信号は設計通りの精度で再現され、したがってアナログ伝送において不可避であった付加雑音の影響は除去できることになる。従って、アナログ方式では品質が劣化するような、たとえば人工衛星通信の場合とか、あるいは低品質のケーブルを活用しようとする場合などに PCM 通信方式は有利となる。また方式としての経済性も、時刻割多重化方式であるため従来の周波数分割で用いられていたフィルタが不要となること、多重化における通話路共通部の占める比重が大きいこと、半導体価格が相対的に低下して来たこと、などから、搬送方式を凌駕する傾向にある。また PCM 方式は

符号伝送であるため、電子計算機を用いた将来の交換方式においては不可欠の伝送方式であり、PCM方式の用途はますます拡大してゆく傾向にある。

1.2 PCM通信方式の品質劣化要因

このように、PCM通信方式は従来のアナログ伝送方式と全く異なる原理に立脚した伝送方式であって、特に復調された音声の品質の面からはアナログ伝送方式でしばしば問題とされる付加雑音の問題は生じない。したがって、すでに前節において少しふれたように、この方式において原理的に避けられない歪みは量子化歪みと過負荷歪みのみとなるので、設計にあたって十分に量子化幅を小さくしまた過負荷レベルを避けるような考慮を払えば、音声に加わる歪みは無視し得る程度に小さく出来るはずである。

しかし現実にはこの十分という線がどこにあるかはっきりしないと、量子化数や最大レベル V を不必要に過剰に選んだり、或いは不足すぎる値に選んだりすることがある。これらの値が過剰であると経済的に無駄であるし、足りないと受話音声の品質が低下する。したがって経済性と品質に対する要求の兼ね合いから最適の値が求まる筈であり、逆に最適値を求めようとすると、どうしても経済的検討のみならず品質的検討が必要になってくる。ここで品質的検討というのは具体的にPCM通信方式が人間の聴覚に与える妨害効果をしらべたり、あるいは被験者自身に評定を求めたりする手続きを意味する。

このような品質的検討は、PCM方式の量子化歪みや過負荷歪みについて行う必要のあることはもちろんであるが、PCM方式には量子化歪みや過負荷歪みのように原理的に避けられない歪みばかりでなく、部品や素子が理想特性に

まで達しないために生ずるいろいろな要因が忠実な波形の再現と妨げ、波形ひずみを生ずる原因となっている場合があり、このような場合についても同様の検討を行う必要がある。たとえば前節で述べたように、非線形量子化を実現するために圧伸器を用いるが、圧伸器の送信側と受信側の特性が完全な逆特性になっていないために生ずる誤整合ひずみがどのような品質劣化をもつかについても調べる必要がある。

また、ひずみはもっと動的な時間構造をもつことがある。すなわち伝送線路の雑音などのために、符号の伝送過程で符号誤りが発生したり、或いは再生パルスの中らぎが生じたりする。符号の誤りは受聴音に鋭いパルス性のひずみを生ぜしめ、再生パルスの中らぎはそのまま再生波形の中らぎとなる。このように種々の品質劣化要因は、その要因が異なるにつれて波形ひずみや品質への影響が異なるが普通であり、従ってそれぞれの劣化要因ごとに品質への影響をしらべその影響を定量的に明確にする必要がある。

本研究で取り上げようとする劣化要因は次のような二つの種類に大別することができる。一つは PCM 方式自体の基本パラメータに属する要因、他の一つは電話系回線で用いられたときの要因である。前者に属する要因としては、量子化段階数、標本化周波数、圧伸特性、音声信号入力レベルなど、量子化ひずみや過負荷ひずみを決定する種々の基本パラメータがあげられ、また後者に属する要因としては、電話系の伝送線路に含まれる線路雑音などの要因が挙げられる。本研究では、これらの要因のそれぞれについて、それが品質に及ぼす影響を種々の角度から明らかにしようとするものである。

1.3 電話通話系の通話品質

電話通話系の「良さ」、あるいは「品質」というや、漠然とした概念は、いかえれば通話の明りょう性や個人的特色などを伝える忠実さの程度と解される。しかしこの忠実さの程度を何らかの数値によって定量的に表現することは必ずしも容易ではない。

まず、通話の良さを測定するのに、送話者・受話者が通話系の両端にいて、送話者の声を受話者が何らかの基準をもうけて判定し数量化するものとする。この場合、受話者は送話者の声と総合的に判定するわけであるから、その判定には送話者の国語・方言・発音などで異なる送話の良さ、その音声を受話者まで送る伝送系の良さ、および受話者の聴力・理解力などで異なる受話の良さの三つが影響して来る。したがって伝送系の良さすなわち伝送品質を定量化しようとする場合には送話・受話の品質を基準化する必要があり、またこの基準化の方法が異なると伝送品質の表現も異って来る。そこで、用語を明確にするために上記の通話の良さを通話品質と呼び、通話品質を構成する3要素を、送話品質、伝送品質、受話品質と呼ぶことにする。

上に述べたことから、通話品質と伝送品質とはほとんど同義に解してよい場合が多いが、通話品質の測定結果から基準となる通話系の相対値によって伝送品質を表現する明りょう度等価減衰量(AEN)の場合、あるいは伝送品質の測定用に考えられた通話当量の場合などは必ずしもそうは言えない。しかし伝送品質は厳密には通話品質の構成要素であり、通話品質として何を選ぶかということによって異なる表現になるので、本研究では通話品質という場合にも伝送品質の意味を含める場合

がある。

通話品質の尺度化については古くから研究が行われていて各種の尺度が使われて来た。すなわちラウドネス、明りょう度、おぼろげ度などである。また新しい通話品質の尺度としてオピニオン平均値、自然度なども研究の途上にある。

通話品質の尺度としてはこのように種々の量が使われているが、その工学的性格から見て明りょう度が最も基本的尺度と考えられる。その上、明りょう度はその定義の明確さにおいても、測定値の信頼性においても他の尺度よりすぐれている。したがってこの研究では、通話品質の尺度としては明りょう度を主尺度としてもちい、他の2, 3の尺度を補助尺度として用いることにした。

明りょう度については、欧米のみならず日本においても長い研究の歴史がある。まず、1947年に米国ベル電話研究所の N.R. French と J.C. Steinberg が明りょう度指数による明りょう度値の予測法を提案してはじめて解析的研究方法が確立された⁽⁵⁾。この方法は日本語の明りょう度にも適用されて、電話回線における伝送品質の評価に極めて有用であることがわかった。⁽⁶⁾

この明りょう度指数を用いた方法では、信号と雑音を長時間スペクトルの面から眺めるという情報理論と同一の基礎に基づいた方法を用いているので、周波数特性の明らかにされた伝送系の影響や雑音妨害量などはかなり正確に計算することができるようになったが、反面、非定常雑音・波形ゆずみなどはその適用の対象には含まれていない。したがってPCM方式における量子化・標本化・過負荷などのゆずみは、たとえそれが雑音に類似の音響的特徴をもつ場合でも、このようなモデルにはあてはまらない。このような従来の方法には適用できない範囲の波形ゆ

ずみを一般的に取り扱うことのできる明りょう度計算法の確立は、通話品質の理論的基礎にとって、実用的見地から重要な意味をもち、と考えられる。本研究は明りょう度指数による明りょう度値予測法を基礎として、このようなより一般的な通話品質の解析法を確立するために行っている研究の一つの道程を示すものである。

第2章 実験装置

2.1 日本主通話標準装置

本研究では明りょう度値の測定をはじめ種々の通話品質測定の実験はすべて日本主通話標準装置によって行った。この装置はスイスの CCITT 研究所に設置された ARAEN 装置などとともに通話の基準状態を規定し、電話伝送系の通話品質を測定するために作られた1次通話標準装置であって、我國で実用化された高品質のマイクロホンおよび受話器をもち、ARAENと同等以上の機能をもつものである。

この装置を用いることにより通話の基準状態を再現することができる。通話の基準状態とは A. H. Inglis⁽¹⁾の提案にしたがって、話者と聴者が騒音のない自由音場空間で1 mの距離で正対するときの音響伝送特性のことで、この装置では話者はマイクロホンを、聴者は受話器を使用し、全体の音響伝送特性が基準状態の音響特性になるように設計されている。なお上記の理想的な通話状態を基準として表わした伝送系のレスポンスを OTR(基準通話レスポンス) といひ、基準状態を基準通話系における系利得 0 dB ときめている。

装置の構成は図2.1 に示す通りで、送話系、線路系、受話系の3部より成っている。受話増幅器に付属する等化器は受話器の出力音圧を基準音場音圧に変換するためのもので、その特性を図2.2 に、また総合伝送特性を図2.3 にしめす。

ARAEN による電話機の AEN(明りょう度等価減衰量)測定は国際電信電話諮問委員会(CCITT)の決定に基づいて ARAEN の線路系に 0.3~3.4 kHz の帯域濾波器を挿入しノイズスペクトル^{*}をもつ起電力 2mV のランダム雑音を付加した SRAEN によっておこなわれる。日本主通話標準装置に同様の帯域濾波器とノイズスペクトル雑音を付加す

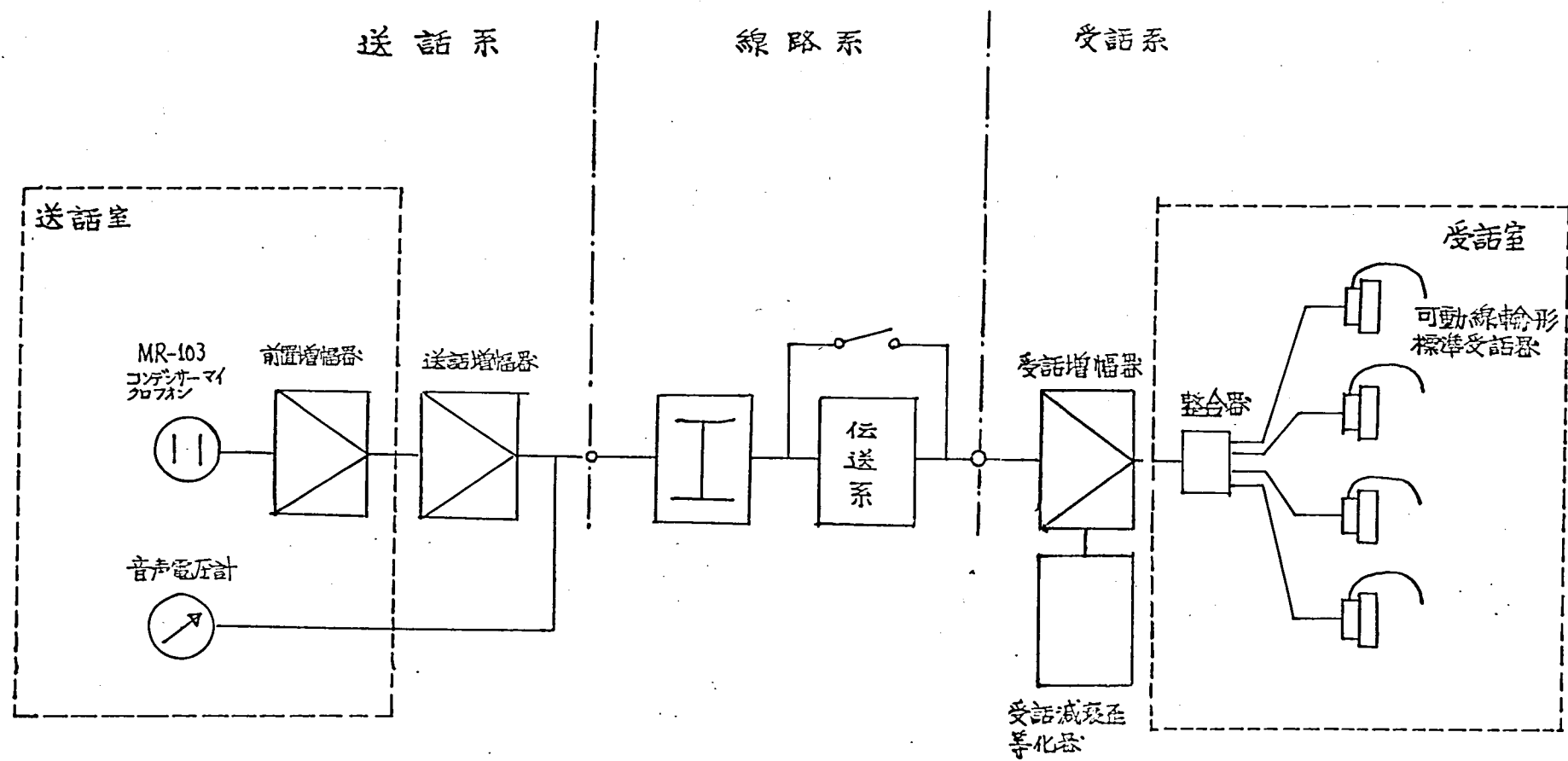


図 2.1 日本主通話標準装置の構成

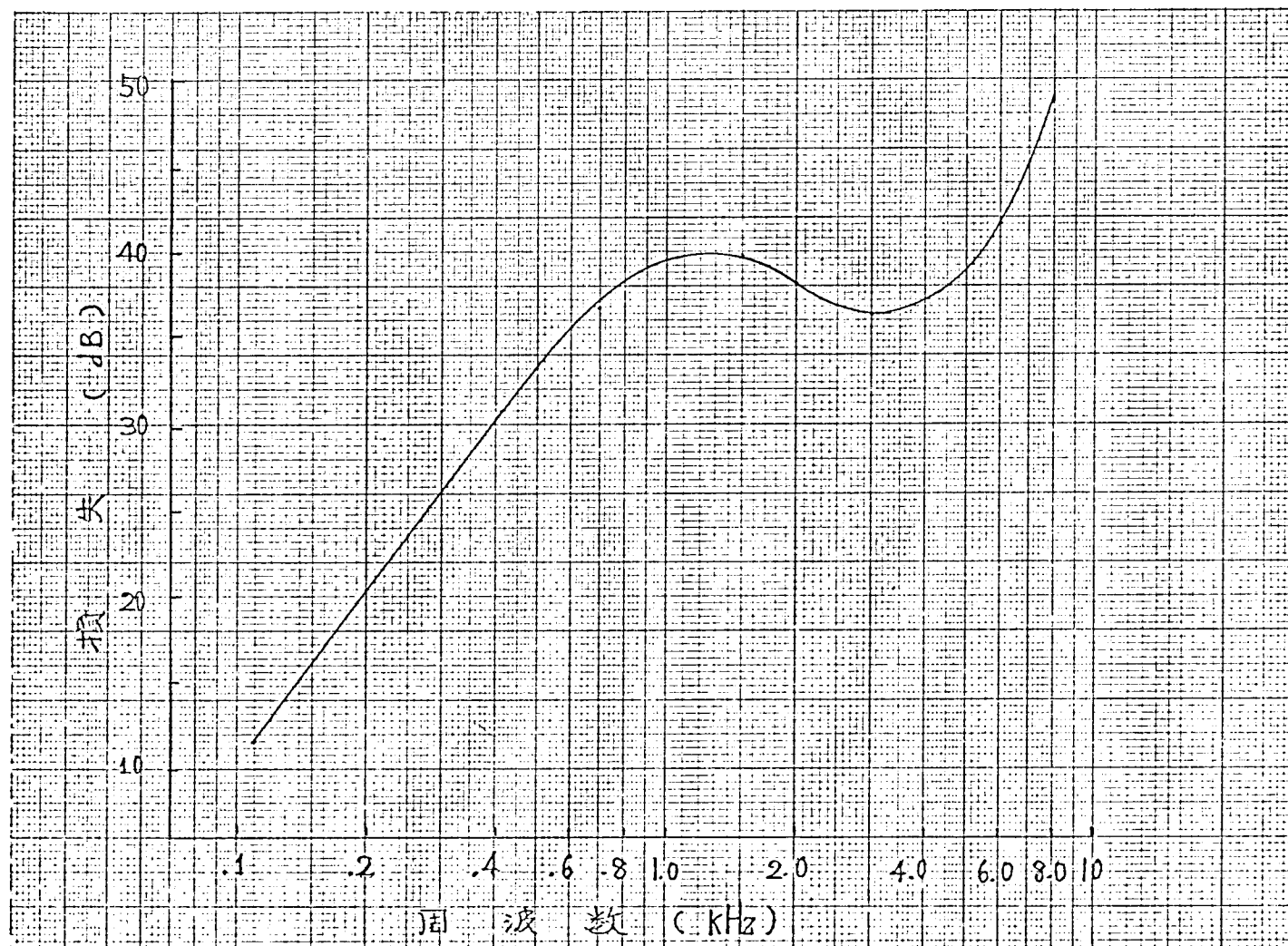


図2.2 受話減衰とずみ等化器の周波数特性

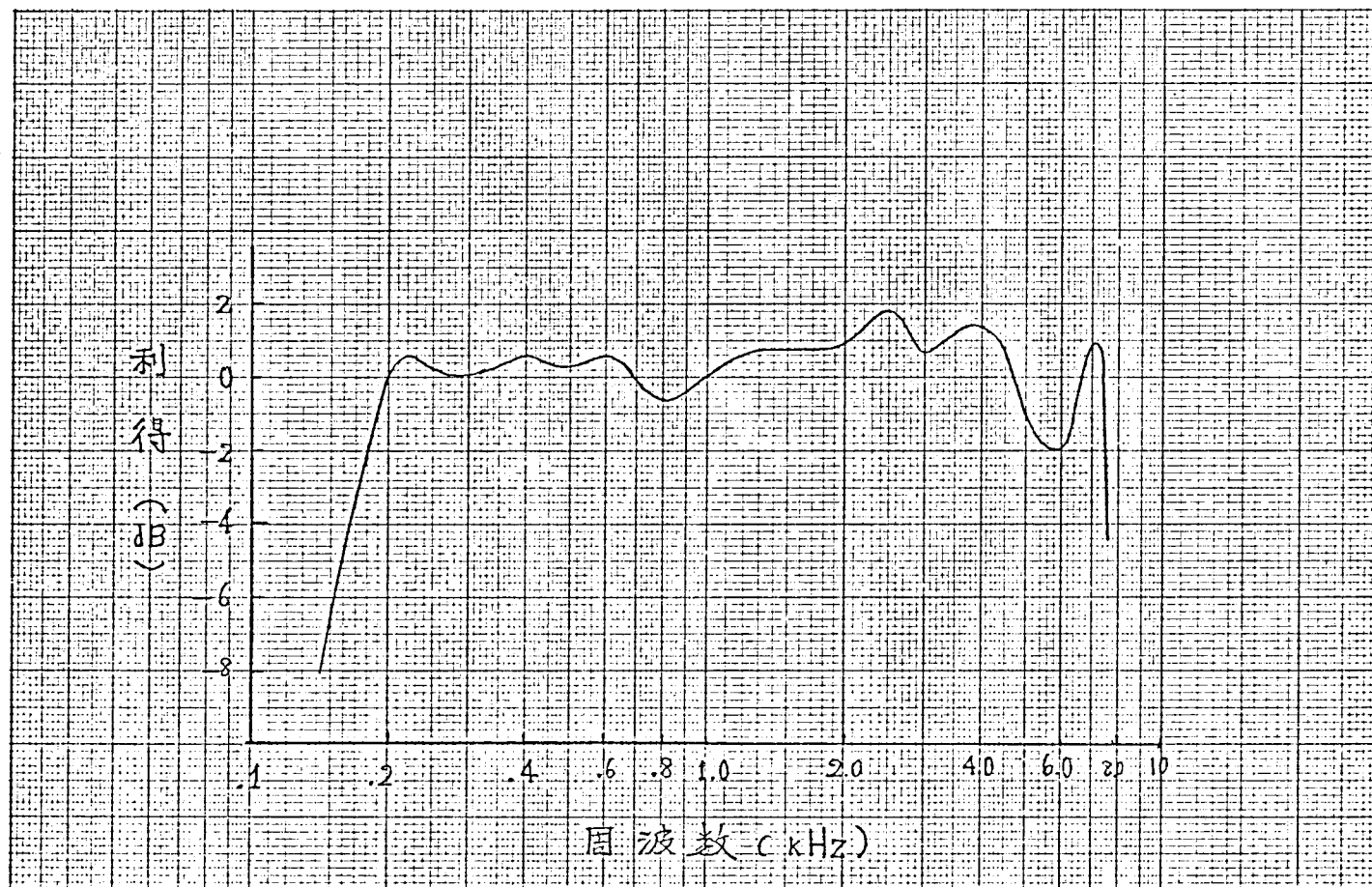


図2.3 日本主通話標準装置総合伝送周波数特性

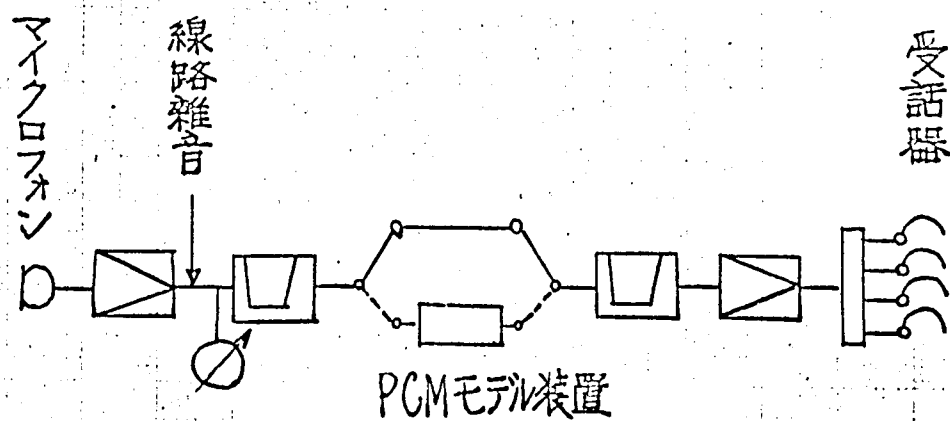


図 2.4 標準通話系試験回線構成図

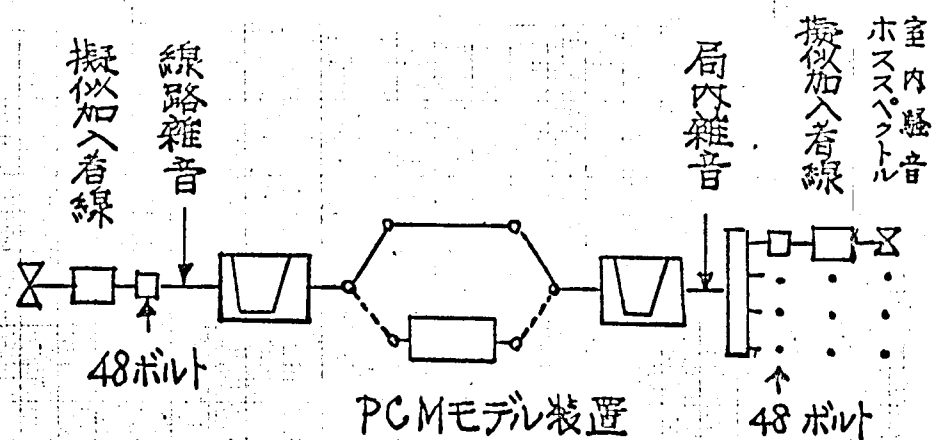


図 2.5 商用電話通話系試験回線構成図

ることにより SRAEN 装置の機能を満足せしめ、電話機の AEN 測定を行うことがで
きる。註 11 頁*) ホススペクトルは電話通話時における室内騒音の平均として定められたスペクトルである。

種々の通話品質測定において、こゝでは日本主通話標準装置をもちいて次の 2
種類の試験回線を構成した。すなわち明りょう度計算法などの基礎データを得る
ためのひずみのない高品質の標準通話系試験回線と、商用電話系における種々の
要因を知るための商用電話通話系試験回線である。標準系回線では図 2.4 にしめず
ように送話側にコンデンサー・マイクロフォンを、受話側には動電形受話器を使用し、
中間の線路部には PCM 装置と SRAEN 用帯域濾波器を挿入した。一方電話系では図 2.5
に示すように商用電話加入着系を送受話端にもちい、受話系入力端に局内雑音(-8
dB, 0.6 mV)を、また受話室に 60 ホン(A)の室内騒音を加えた。

2.2 PCM モデル装置

PCM モデル装置は PCM 方式の通話品質の研究に使用するための研究用モデル装置
であって、本研究では主としてこの装置をもちいて通話品質の測定をおこなった。
この装置は単一通話路であって、ビット数 2~10、標本化周波数 4~12.5 kHz、圧
伸特性 $\mu=50, 100, 150$ (対数圧伸)の各条件を選んで符号変調を行うことができ、ま
た PAM 系としても切替えて使うことができる。

図 2.6 は本装置前面の写真、図 2.7 は本装置の簡略なブロック図で、入力信号は低
域フィルター LPF、圧縮器を通った後で標本化され PAM 信号となり、さらに符号器
COD によって PCM 信号(符号パルス)に変換され、増幅器 TA から送出される。図 2.8 は
入力波と PAM 信号波形、図 2.9 は PAM 信号とこれに対応する符号パルス波形を示し
たものである。受信側では増幅器 RA を通り復号器 DEC によって符号パルスは再び
PAM 信号にもどされる。再生された PAM 信号は伸長器、LPF によって連続波形に

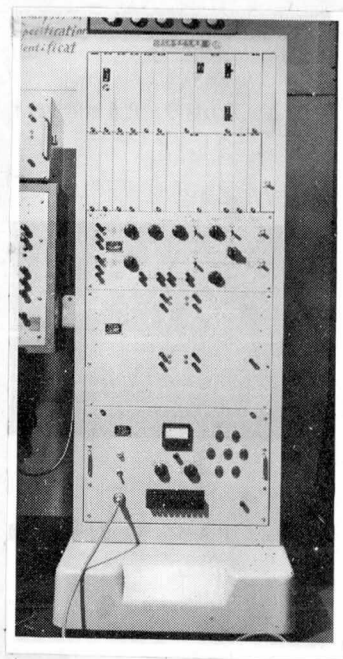


図2.6 PCMモデル装置前面

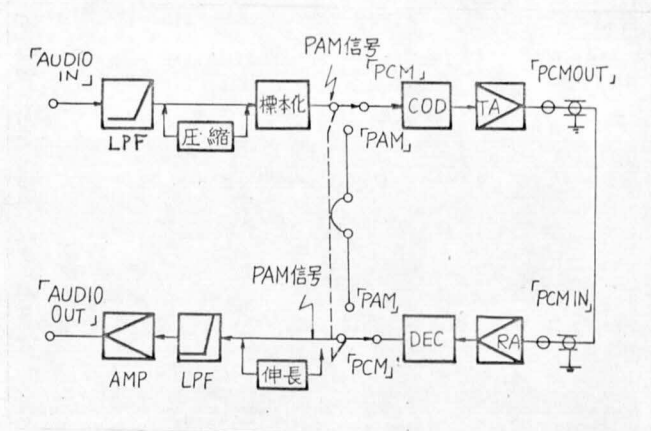


図2.7 PCMモデル装置ブロック図

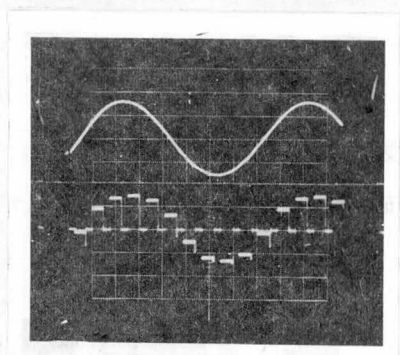


図 2.8 入力信号(上)とその標本化波形(下)

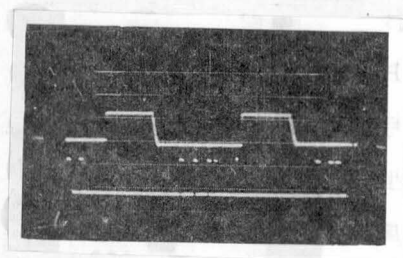


図2.9 標本化波形(上)とその符号パルス波形(下)

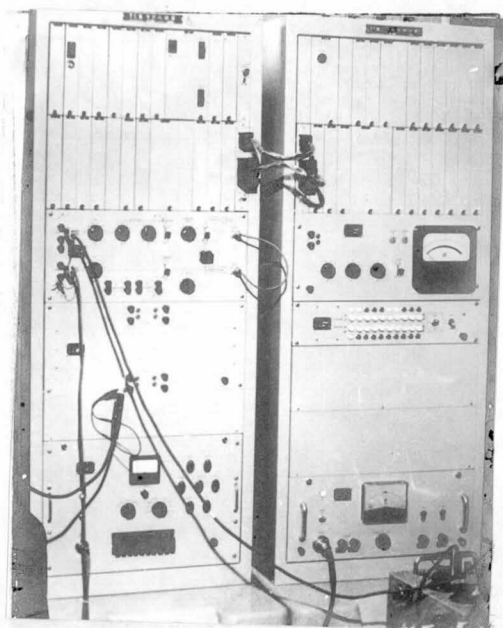
復元され、AMP を通って「AUDIO OUT」端子に導かれる。また、スイッチの切替えにより、PAM 信号は PCM 信号に変換されることなく、伸長器 LPF に導くことも出来る。

本装置の規格および性能の概略は次のようになっている。標本化周波数は 4, 6.25, 8, 10, 12.5 kHz の 5 段階で、精度 $\pm 0.1\%$ 、入出力滤波器は標本化周波数に対応した 5 種類をスイッチで切替え出来る。標本化周波数の 0.45 倍の周波数 f_0 において、各滤波器は 3dB 以上の減衰量があり 1.3 f_0 で 50dB 以上の減衰量がある。PAM 系については、周波数特性は低域滤波器の特性を除外すれば 50~6000Hz において偏差 ± 0.5 dB 以内、ひずみ減衰量は 0 dBm 入力にて 53dB 以上、S/N 比は -20 dBm 入力にて 53dB、最大入力信号は 0 dBm である。PCM 系については、1 ビットステップの精度は $\pm 0.1\%$ 以下、圧伸特性は $\mu = 50, 100, 150$ および直線の 4 種でその偏差は 2% 以下である。また雑音レベルは無信号時にて -73 dBm である。

2.3 PCM レベル分離装置

本装置は PCM モデル装置と組合わせて PCM 通信方式の通話品質評価の基礎研究に使うために設計試作された装置である。本装置は信号振幅の指定された範囲を部分的に量子化できることがその主要な特徴である。すなわち PCM モデル装置と組合せたとき本装置は可聴周波入力信号に対し以下の処理を行うことができる。

- (1) 入力信号レベルの指定された範囲は振幅量子化し、指定された以外の範囲に対しては振幅量子化を行わない。
- (2) 入力信号レベルの指定された範囲は振幅量子化を行うことなく、指定された以外の範囲に対して振幅量子化を行う。



(左) PCMモデル装置 (右) PCMレベル分離装置

図 2.10 PCM レベル分離装置 (PCMモデル装置と連結)

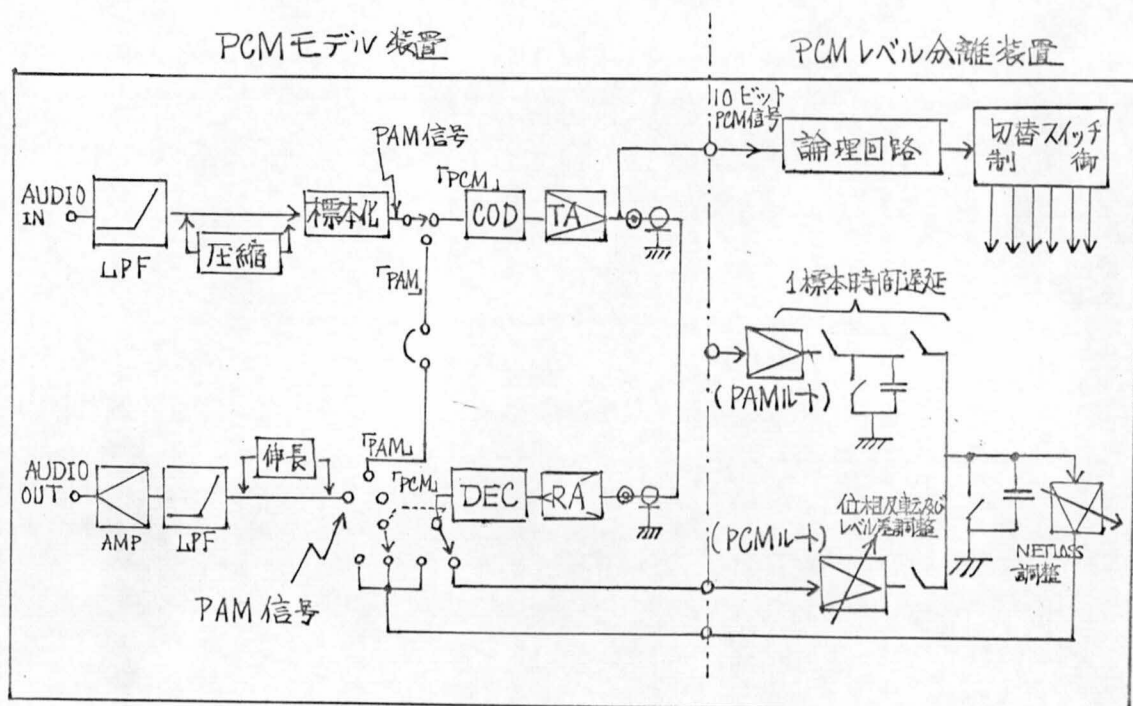


図 2.11 PCM レベル分離装置ブロック図

- (3) 入力信号の全レベルに対して振幅量子化を行う。
- (4) 入力信号の全レベルに対して振幅量子化を行わない。

本装置を PCM モデル装置と連結した写真を図 2.10 にしめす。また本装置の回路

構成の大略を図 2.11 にしめす。本

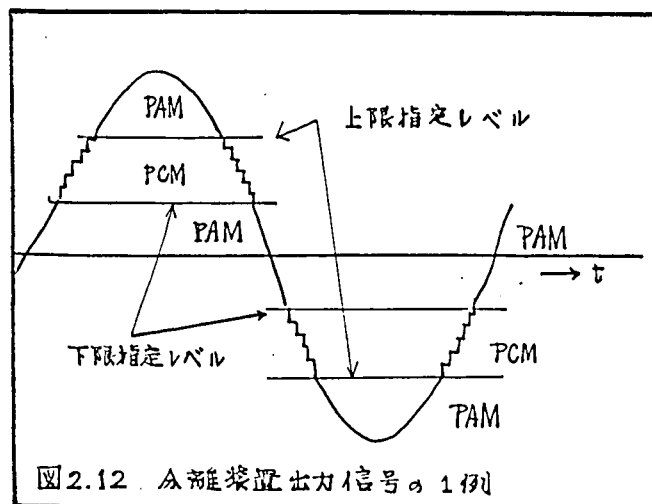
装置は PCM モデル装置から標本化

された信号(符号器入力)と標本

化されてからさらに振幅が量子

化された信号(復号器出力)とを

受けとり、指定されたレベルに



従って どちらか一方の信号をモデル装置にもどすことにより部分量子化の操作と遂行することが可能である。本装置により部分的に量子化された出力波形の 1 例についてその説明図を図 2.12 にしめす。図 2.12 において 上限指定レベルおよび下限指定レベルは、2進10桁の符号をパネル盤上のスイッチで設定することにより分離装置に読込ませることが出来る。またこのとき PCM 部分の量子化粗さは PCM モデル装置のビット数指定スイッチによって与えられる。レベル分離装置の精度に対する規格としては PAM 部分と PCM 部分の相対遅延時間が 1 標本周期の $\frac{1}{10}$ 以下であること、入力信号の全レベルに振幅量子化を行ったときと、全レベルに振幅量子化を行わないときのレベル差が基準入力 (PCM モデル装置 入力端子において -20 dBm) に対して $\pm 0.02 \text{ dB}$ 以下であることとなっている。

2.4 PCM誤符号発生装置

本装置はPCMモデル装置に連結し、PCMモデル装置の符号パルスに符号誤りを発生せしめる装置で、符号誤りの通話品質に及ぼす影響を知るために用いられる。装置の原理は白雑音を適当な設定レベルでスライス・整形して得られる発生確率の決ったランダムパルス、または手動によって発生したパルスをエラー・トリガー（誤り起動）パルスとして、PCMモデル装置の符号パルスに誤りを発生させ、これを再びPCMモデル装置の復号部に挿入する機能をもっている。その大略の

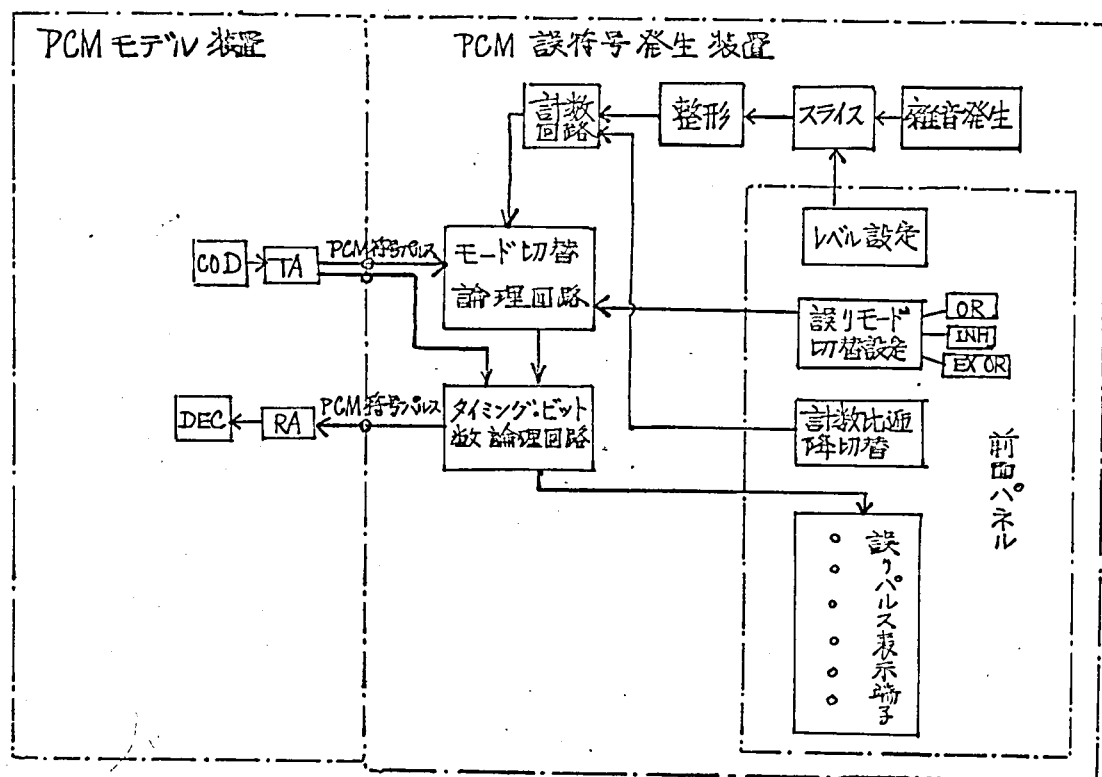


図 2.13 PCM誤符号発生装置 構成図 (PCMモデル装置と連結)

構成図を図2.13にしめす。

図2.13において計数比遊降の切替スイッチは 10^0 , 10^1 , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} の5種類を切替え可能で、或る雑音の発生回数に対して誤りパルスの発生確率を上記の5種類の比率のうちのどれかに設定し遊降せしめることができる。また、誤符号モードの切替えスイッチにより誤符号様式を「OR」, 「INH」, 「EX OR」の3種類のうちいずれかに設定できるようになっている。「OR」の場合はエラー・トリガーが入ってきた時スペースはマークに変わるが、マークの場合はマークのままであり、「INH」の場合はマークはスペースに変わるが、スペースの場合はスペースのままであり、「EX OR」はマーク、スペースともに入れ換わるようになっている。

誤りパルス表示端子にカウンターを接続することにより、或る期間内の誤り回数は容易に知ることができ。

2.5 24通話路PCM端局装置

本装置は日本電信電話公社電気通信研究所において実用化が進められた近距離市外回線および大都市区域内中継線用の24通話路PCM端局装置であって^(a)、本研究ではオ4章で述べる多リンク接続の実験にのみ用いた。

本装置は振幅量子化ビット数4ビット、符号は2進符号で全0符号を除いてあり、標本化周波数8kHz、圧伸は対数圧伸 $\mu=100$ であり、実用機としての十分な考慮がなされている。

オ3章 PCM系基本パラメータの品質評価

3.1 概論

本章では PCM方式の通話品質劣化要因のうち、PCM方式自体の基本パラメータに属する要因をとり上げた。「PCM系の基本パラメータ」なる用語は狭義には標本化周波数、量子化ビット数、圧伸パラメータ、通話路数、クロック周波数の五つのパラメータを指すが、ここではこの定義にとらわれなくて、PCM方式自体のいろいろな設計要因および音声入力レベルなどの伝送基準的な要因をもとり上げた。すなわち量子化ビット数、信号入力レベル、圧伸特性、過負荷ひずみ(信号入力レベル)、標本化周波数、圧伸特性による誤整合の六つの要因である。

本章では通話品質尺度としては単音明りょう度を主たる尺度として用いたが、3.10節では オピニオンを補助尺度として併用した。また、明りょう度および オピニオンによる PCM通話系の品質測定結果は、そのまゝの形で PCM系そのものによる品質劣化量を明らかに表現しているものとは言い難い。PCM系そのものの品質劣化量を明らかにするためには、PCM系の通話品質の測定結果とPCM系を含まない直通系の通話品質測定結果と比較し、PCM系のみによる劣化量を明示する必要がある。このための方法としては、劣化量をすべて等価な信号レベルの減衰量によるものとして表現する明りょう度等価減衰量の考え方があるが、ここではこれを直通系における等価な白雑音レベルにおきなおして表現することを試みた。

すなわち、この方法では量子化ひずみの品質劣化は、それと等しい品質劣化をもつ直通系の白雑音レベルによって表わされることになる。量子化ひずみは通常量子化雑音と呼ばれることが多く、その聴覚的な感覚も白雑音に類似の質がある。従って量子化ひずみを白雑音に対応させるときの対応関係は、類似性に主脚した自然で安定なものと考えられ、このような対応関係をもった等価雑音による

評価方法は再現性や信頼性、更には一義性などの点ですぐれた方法と考えられる。

またこのような等価雑音の表現は直通系の雑音レベルによる表現であるから、これを等価な線路損失分(AEN)に換算することも可能である。この等価線路損失分との対応関係については従来多くの測定が試みられており、この関係はかなり確立した関係として知られている(第8章参照)。従って等価雑音法を採用することによって、波形ゆずみに関して安定性や信頼性に富みしかも従来の測定値や計算法などとの対応関係が明確な通話品質評価が得られることになる。

本章では等価雑音の誘導法や基本パラメータに関する品質測定結果の等価雑音による表現などについて述べ、AENとの関係などは第8章で扱う。

第8章において、AEN表示は同一の劣化要因に対して通話系の差により結果が異なり、劣化要因と劣化量との間は一義的な対応関係がないことが示されているが、等価雑音の場合には量子化ゆずみ電力との間には一義的な関係が成り立っており、等価雑音表現の適切なことが明らかである。

さらに等価雑音表現は音韻性以外の側面に着目する、たとえばオピ=オシのような通話品質尺度についても適用することができ、直通系との比較によって明りよう度以外の種々の尺度についても明りよう度と同様等価雑音レベルが誘導できる。このことによって種々の尺度による評価結果を同一単位で直接比較することが可能になる。これらの異った尺度の等価雑音に関する比較は主として第7章において扱い、本章では主として明りよう度による等価雑音の結果を中心に述べる。

3.2 明りょう度試験法⁴⁾

明りょう度は送話者の発声する基本的語音が正しく伝えられる程度、すなわち基本的語音の受話識別率をもって品質の測度とするもので、通常パーセント(%)で表わす。日本語の場合には通常「音節表」を送話し、基本的語音として単音を取り、単音の識別率すなわち「単音明りょう度」を明りょう度の値として用いるのが普通である。

ここで音節とは、日本語の仮名文字に相当する文字音の最小単位であり、単音とは、音韻に相当する音声学的な最小単位である。たとえば“abe”と発音したときには、単音の総数は3個と考えられる。一般には、調音器官が一定の位置をとるかあるいは一定の運動を繰返しているときには、その語音は必ず一つの単音に対応していると考えてよい。

日本語は仮名文字が文字音の基本となっているので、基本的な語音としては音節を単位にすべきであるとの考え方もあり得るが、たとえば録音音声を逆転すればその単位が容易に変わってしまうことから見ても最小単位は単音とするのが正しいと考えられる。

しかし、単音明りょう度と、音節を単位とした音節明りょう度との間には多くの場合一定した関係が見出されるので、単音明りょう度を用いることと、音節明りょう度を用いることとの間には本質的な差はないものと考えられる。同様に子音と基本的語音とみなし、これに着目して識別率を計算する子音明りょう度や、母音と基本的語音とみなす母音明りょう度なども存在し、これらは単音明りょう度や音節明りょう度と密接な関連を持っている。PCM系におけるこれらの詳細な異聴現象については次の章において詳しく述べる。

ア	a	イ	i	ウ	u	エ	e	オ	o
カ	ka	キ	ki	ク	ku	ケ	ke	コ	ko
サ	sa	シ	ʃi	ス	su	セ	se	ソ	so
タ	ta	チ	tʃi	ツ	tsu	テ	te	ト	to
ナ	na	ニ	ni	ヌ	nu	ネ	ne	ノ	no
ハ	ha	ヒ	hi	フ	hu	ヘ	he	ホ	ho
マ	ma	ミ	mi	ム	mu	メ	me	モ	mo
ヤ	ja			ユ	ju			ヨ	jo
ラ	ra	リ	ri	ル	ru	レ	re	ロ	ro
ワ	wa								
ガ	ga	ギ	gi	グ	gu	ゲ	ge	ゴ	go
ザ	dza	ジ	dʒi	ズ	dzu	ゼ	dze	ゾ	dzo
ダ	da					デ	de	ド	do
バ	ba	ビ	bi	ブ	bu	ベ	be	ボ	bo
パ	pa	ピ	pi	プ	pu	ペ	pe	ポ	po
キャ	kja			キュ	kju			キョ	kjo
シャ	ʃa			シュ	ʃu			ショ	ʃo
チャ	tʃa			チュ	tʃu			チョ	tʃo
ニャ	nja			ニュ	nju			ニョ	njo
ヒャ	hja			ヒュ	hju			ヒョ	hjo
ミャ	mja			ミュ	mju			ミョ	mjo
リャ	rja			リュ	rju			リョ	rjo
ギャ	gja			ギュ	gju			ギョ	gjo
ジャ	dʒa			ジュ	dʒu			ジョ	dʒo
ビャ	bja			ビュ	bju			ビョ	bjo
ピャ	pja			ピュ	pju			ピョ	pjo

図3.1 明りょう度試験に用いられる日本語音節(計100)

送話に用いる音節表は、すべての直音、濁音、半濁音、拗音を含む必要があり、通常の用途には 3.1 図に示すような 100 音節平等率のものが用いられる。平等率というのはすべての日本語百音節がすべて等しい出現確率 0.01 で送話されるという意味であって、各音韻の出現の順序のみ異なる無数の音節表を作ることができる。送話音節表にはこのほか異聴試験に用いられる 116 音節のものや、医療用の音節数の削減されたものなど種々の変形があるが、ここでは関係がないのでふれない。

さて、100 音節表には、95 個の CV 音節(子音+母音)と、5 個の V 音節(純母音)があるが、単音としてみた場合これは 95C, 95V, 5V で合計 195 個の単音を含むことになる。しかし異聴の問題を考えると純母音の前にも透明子音(・)なるものを考え、 $\cdot a \rightarrow ka$ の異聴と 単音の異聴 $\cdot \rightarrow k$ が生ずるとして扱う必要があると考えられる。結局 100 音節表の中に存在する単音の総数は 200 個となる。

次に、明りょう度測定に従事した通話試験員は何れも 25才以下の 4 人の女子で、最小可聴値を示すオーディオ・グラムその他の評価方法によって、正常な語音発声能力と聴力を有することが確認され、このような心理測定に熟練したものばかりである。

明りょう度測定を行う種々の試験伝送条件は無作為の順序に呈示される。4 人の試験員の中の任意の一人が送話者に、3 人が受話者となり、ある試験条件によって 1 枚の音節表によって明りょう度試験を行い、終れば送話者が交代するとともに、別の任意の試験条件について試験を続けてゆく。各試験条件には 4 人の試

験員が1回ずつ送話することになり、それぞれについて3人の受話データを得るので、合計12組の送受話データが得られることになる。したがって明りょう度は100音節表で1200音節、即ち2400単音による明りょう度の平均値として決められる。その他、測定系に人間が含まれることによって生ずる好ましくない偏差、たとえば練習効果、疲労現象による偏差はこれをできる限り除去して、測定値の信頼性を高めるようにした。

なお3.10節において補助的に用いたオピニオンは、被験者の主観的な評価値を集計して対象の品質の測度とするもので、評価値は4, 3, 2, 1, 0の5段階である。詳細についてはオケ章の説明を参照されたい。

3.3 等価雑音の誘導⁽²⁾

明りょう度測定の結果は通常単音明りょう度による等価減衰量(AEN)として表示されることが多い。これは品質の劣化をすべて線路損失に換算評価する方法であって、便利で実用的であるが、そのまゝではこゝで問題としている信号の波形ひずみとの間に単純な関係を見出すことはできない。こゝでは3.1節で述べたように、波形ひずみを受けた信号の品質を表現するのに、品質の劣化量を直通系における等価な自雑音レベルおよび等価なレベル変化分の2成分に分けて表現する新しい方法について説明する。誘導法の説明図を図3.2に示す。

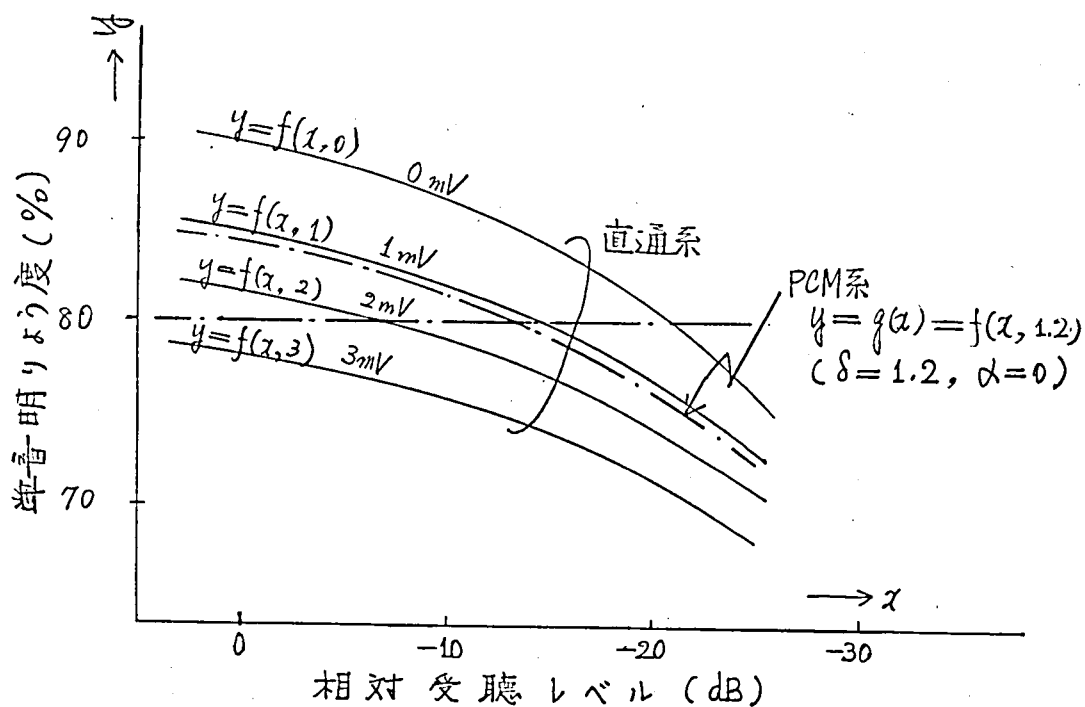
まず、単音明りょう度 y を縦軸に、受聴レベル x と横軸にとり、線路雑音レベル δ (mV) をパラメータとした直通系の明りょう度曲線が求められているものとする。すなわち、

$$y = f(x, \delta)$$

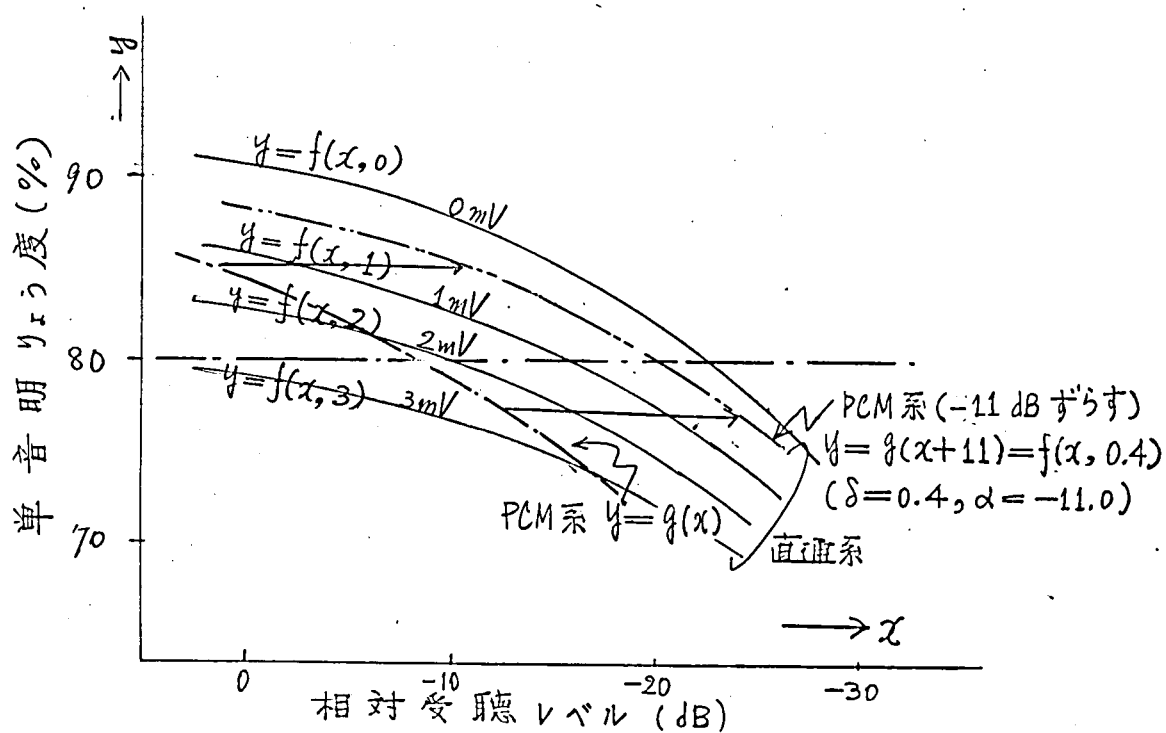
で表わされているものとする。PCM系の明りょう度曲線

$$y = g(x)$$

がもしこれと一致すれば、このときのPCM系の等価雑音は δ (mV) である。またもし $f(x, \delta)$ を α (dB) だけ平行移動した曲線と一致すれば、 $g(x)$ は等価レベル変化 α と等価雑音 δ をその成分として同時に持っている。このような δ , α は直通系のデータとPCM系のデータとを直接比較することにより容易に求まり、これによりPCM系のひずみは明りょう度品質の上で等価な雑音成分とレベル変化成分に分解して表現できる。この方法がひずみの通話品質表現にとって極めて有効であることを次節以下の具体的データにより示そう。



(a) 等価レベル変化のない場合 (量子化はずみ)



(b) 等価レベル変化のある場合 (過負荷はずみ)

図3.2 等価雑音および等価レベル変化の誘導

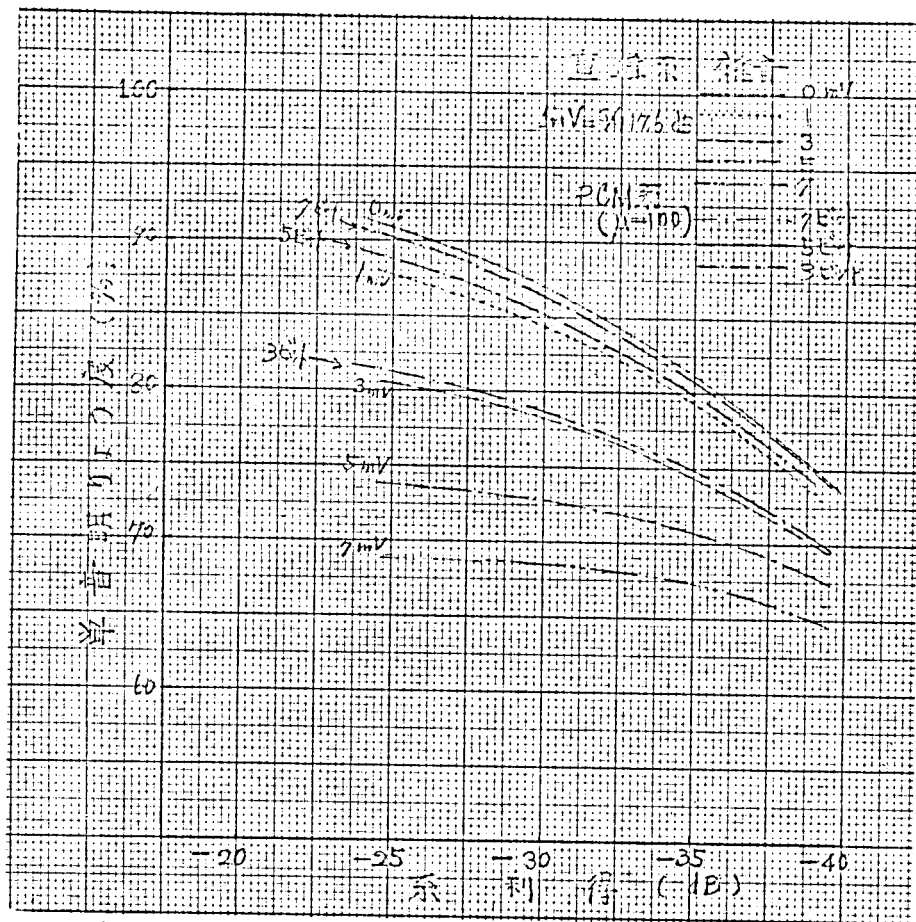


図 3.3 標準系単音明りよう度

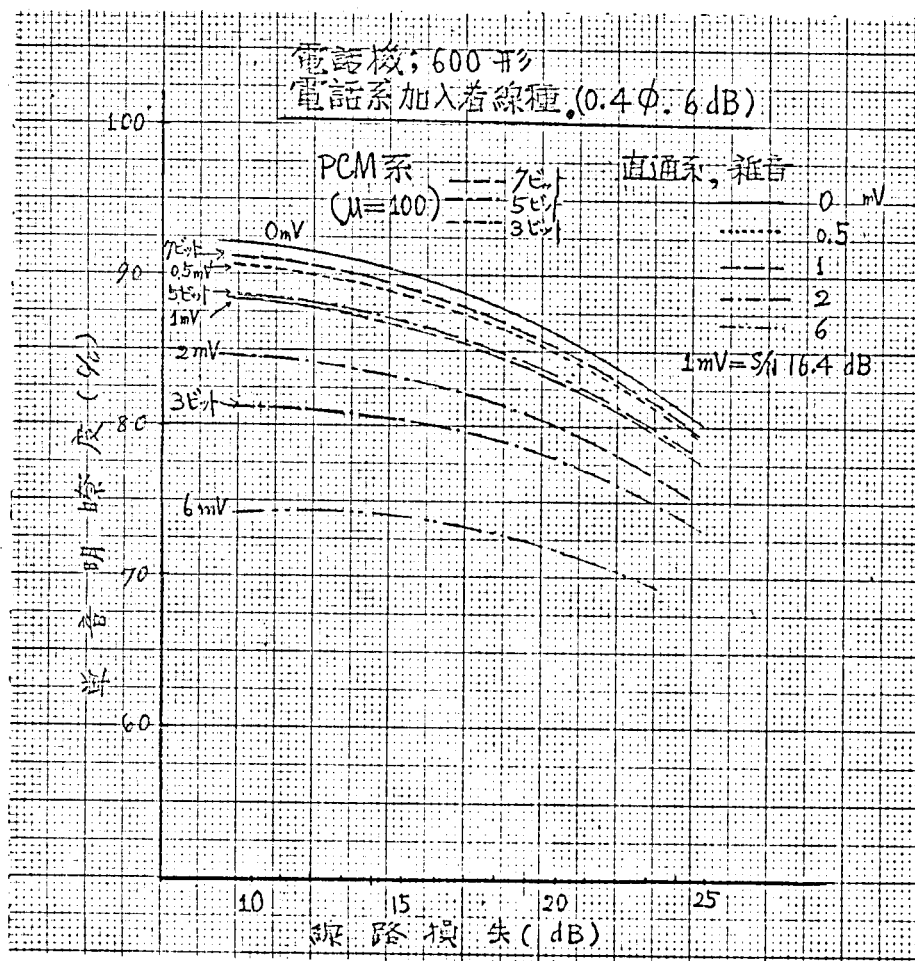


図 3.4 電話系単音明りよう度

3.4 信号振幅量子化の影響

はじめに PCM系の振幅量子化の影響を圧伸率 $\mu=100$ 、音声信号入力レベル -13 dBの標準的條件のPCM系について、ビット数を7, 5, 3と変えてしらべた。ここで音声信号入力レベルは過負荷域値の正弦波レベルを基準値0 dBとして表示しており、 -13 dBの入力レベルは、ほぼ過負荷を生じない最大レベルとなっている。標準系および電話系の結果を図3.3 および図3.4 にしめす。図3.3の横軸は0OTRの値を0 dBとして系利得で表現したものであり、図3.4の横軸は電話伝送路の線路損失値である。また等価雑音を誘導するために直通系に加えた線路雑音の単位1 mVは、標準系ではS/N比17.6 dB、電話系ではS/N比16.4 dBに相当している。

図3.3、図3.4 から等価雑音を誘導した結果を図3.5の実線で示す。図3.5では横軸に振幅量子化ビット数、縦軸に信号対明りょう度等価雑音比をとっており、標準・電話両系の結果はほとんど完全に一致しているので一本の実線にまとめて表示してある。このことは標準系と電話系とで通話系の条件にかなりの差があるに

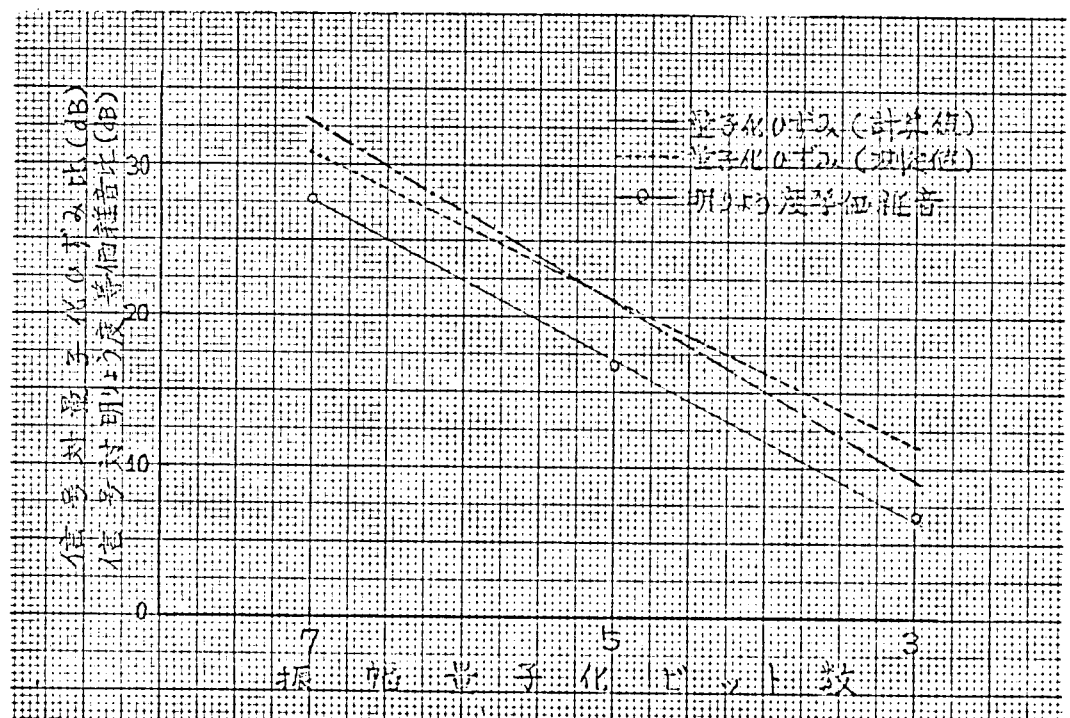


図3.5 信号対明りょう度等価雑音比および信号対量子化ゆがみ比のビット数に対する関係

もかゝわらず，直通系との比較によって誘導した等価雑音には差が生じないといふことであって，この試験の範囲では PCM 系の量子化しずみと電話系の各種のしずみの間に相乗効果が存在しないことを意味している。

次に，明りょう度等価雑音と量子化しずみとの関連について述べる。前者は明りょう度測定から導かれた主観的量であり，それに対して後者は量子化によって生ずる波形しずみ量である。こゝでは量子化しずみ電力 D を計算⁽³⁾ および実験により求めた。

量子化しずみ電力 D は，各量子化ステップ（出力平坦レベル） y_i ($i=1, 2, \dots, N$) に対する入力レベル x の区間 $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ における微小しずみ電力 w_i を i について加え合せた形であらわされる。 $y_i \cong (x_{i+1} + x_i)/2$ 従つて $y_i - x_i \cong x_{i+1} - y_i (\equiv \Delta x_i)$ なることおよび信号の確率密度 $p(x)$ が $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ で一定値 $p_i(x)/2\Delta x_i$ であることを仮定すれば

$$D = \sum_{i=1}^N w_i = \sum_{i=1}^N \int_{x_i}^{x_{i+1}} (y_i - x)^2 p(x) dx \cong \sum_{i=1}^N \frac{p_i(x)}{2\Delta x_i} \int_{-\Delta x_i}^{\Delta x_i} u^2 du = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^N (x_{i+1} - x_i)^2 p_i(x) \quad (3.1)$$

となる。オ1章 図 1.4 に示した非直線量子化を圧伸器をもちいておこなう場合には，圧伸特性を対数形と限定すると線形符号器の前後に圧縮器による圧縮特性

$$y = \frac{V \cdot \log_e(1 + \mu x/V)}{\log_e(1 + \mu)} \quad (\text{たゞ } V \text{ は過負荷レベル}) \quad (3.2)$$

および伸長器による伸長特性

$$z = \frac{V}{\mu} \cdot \left[\exp \left\{ \frac{y}{V} \cdot \log_e(1 + \mu) \right\} - 1 \right] \quad (3.3)$$

が挿入されるから， y の量子化幅 Δy と x の量子化幅 Δx が十分小さい場合には，

$$\Delta y \div \left(\frac{dy}{dx} \right) \cdot \Delta x = \frac{V\mu / \log(1 + \mu)}{V + \mu x} \cdot \Delta x \quad (3.4)$$

となる。 y は線形符号器で均等量子化されるから $\Delta y = \frac{2V}{N}$ であり，従つて式(3.4)から

$$\Delta x \div \{ \log_e(1 + \mu) / V\mu \} \cdot (V + \mu x) \cdot \Delta y = d(V + \mu x) \quad (3.5)$$

ただし $\alpha = 2 \log_e(1 + \mu) / \mu N$

となる。式(3.5)の誘導においては $0 \leq x \leq V$ として式(3.2)を用いたが、 $-V \leq x < 0$ の場合式(3.2)は $0 \leq x$ の場合と奇関数の関係にある式

$$y = \frac{V \cdot \log_e(1 - \mu x/V)}{\log_e(1 + \mu)} \quad (3.2)'$$

となるので、これを考慮すれば $-V \leq x < 0$ の場合 Δx は(3.5)に対応して

$$\Delta x = d(V - \mu x) \quad (3.5)'$$

となる。式(3.5), (3.5)' を式(3.1)に代入すれば、 \bar{A} を A の期待値として

$$D = \frac{\alpha^2}{12} \cdot [V^2 + \mu^2 \bar{x^2} + 2\mu V \cdot \overline{|x|}] \quad (3.6)$$

となる。こゝに $|x|$ なる絶対値記号は式(3.5)と(3.5)'の符号の差によって導入される。通常の圧伸器に適用される場合には圧伸特性の正負領域での対称性により、

$$|x| = 2 \int_0^V x \cdot p(x) dx \quad (3.7)$$

となる。入力信号電圧実効値を S で表わすと、式(3.6)から次式が得られる。

$$D/S = (D/\bar{x^2})^{\frac{1}{2}} = [\log_e(1 + \mu)] \cdot [1 + (C/\mu)^2 + 2AC/\mu]^{\frac{1}{2}} / \sqrt{3}N \quad (3.8)$$

ただし、 $A = \overline{|x|}/\sqrt{\bar{x^2}}$, $C = V/\sqrt{\bar{x^2}}$ である。 (3.9)

式(3.8)を導く過程には Δy が十分に微小、すなわち N が十分に大でなければならぬという仮定が入っている。 N が小さい場合には誤差が無視し得なくなる。これは具体的には5ビット未満で大きく現れて来る。この場合には音声のレベル分布の実測結果および量子化条件から

$$D = \sum_{i=1}^N \int_{x_i}^{x_{i+1}} (y_i - x)^2 \cdot p(x) dx \quad (3.10)$$

を計算する：とが必要になる。こゝでは7ビットおよび5ビットの場合を式(3.8), (3.9)を用いて計算し、3ビットの場合を(3.10)を用いて計算した。

これらの計算結果を図3.5に一実線線で「計算値」として示す。また、これらの計算の根拠となった明りょう度試験被験者中女子2名の音声レベル分布の平均値を図3.6

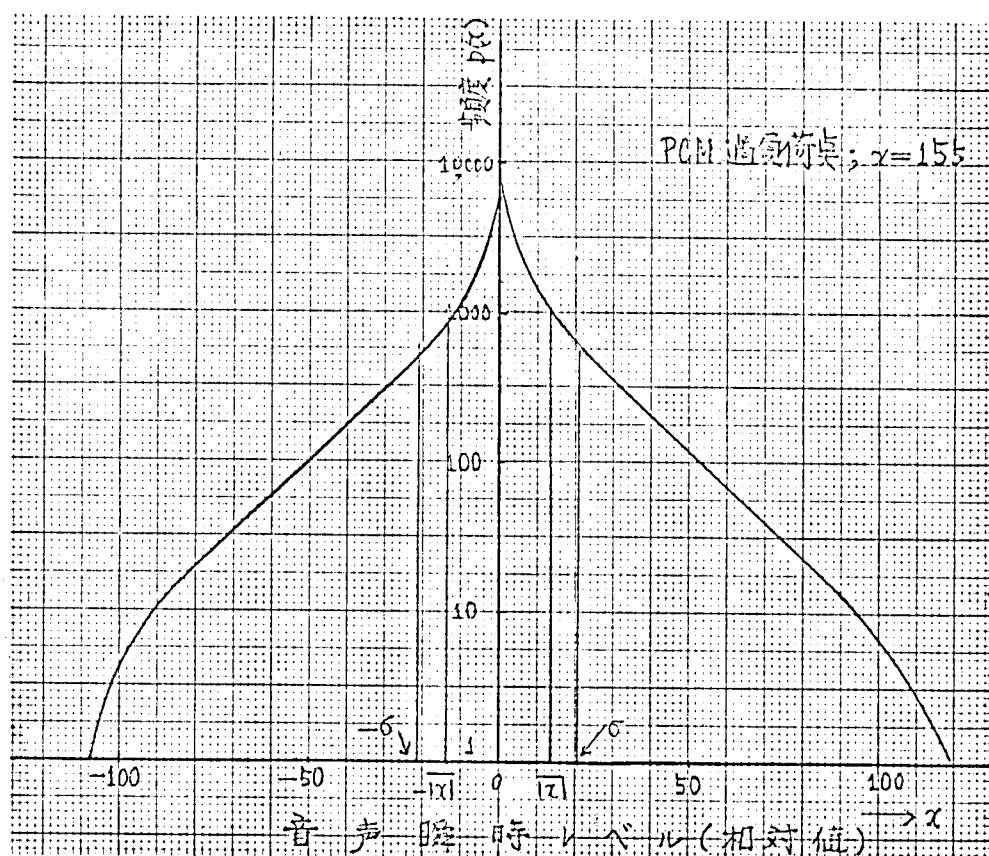


図3.6 明りょう度試験用音節レベル分布(女子試験員2名の平均)

に示す。

つぎに、量子化しずみの測定はPCMモデル装置に900 Hz正弦波を入力信号として加え、その出力波形をわい率計で測定することにより、信号対量子化しずみ比の形で求めた。この測定結果を図3.5に実線で示した。

図3.5にはこのようにして求めた信号対等価雑音比、信号対量子化しずみ計算値ならびに実測値がそれぞれビット数の関数として表示されているので、これから等価雑音としずみ電力の相互関係を見出すことができる。この結果、明りょう度等価雑音と量子化しずみ電力との間にはおよそdB値で一定差とみなし得る関係があることが推察される。この一定差の値はおよそ3 dBとみなし得る。すなわち量子化しずみが通話品質におよぼす影響は、常にそれよりおよそ3 dBだけ電力の大きいガウス雑音のおよぼす影響に等しいということが結論される。

3.5 信号入力レベルの影響⁽⁴⁾

本節では、信号入力レベルが通話品質におよぼす影響を調べる。PCM系では信号入力レベルを変化させると、信号出力レベルが変化するのが普通であるが、ここでは信号入力レベルの影響のみを独立に知る目的で、信号レベルの変化分を出力端で補償してある。信号入力レベルをいろいろに変えて測定した明りょう度試験の結果から、前節にならって明りょう度等価雑音を誘導した結果を図3.7に示す。この図の横軸のPCM系信号入力レベルは、通負荷域値の正弦波レベルを基準0 dBとして表示してある。図3.7の結果から、信号入力レベルの変化に対する信号対明りょう度等価雑音の関係が各ビット毎に明らかになったが、やはりここでも標準系と電話系との差はほとんど見られな。ここで信号入力レベルが-13 dBから-35 dBの範囲では、圧伸特性のため信号対等価雑音比はほぼ一定に保たれているが、入

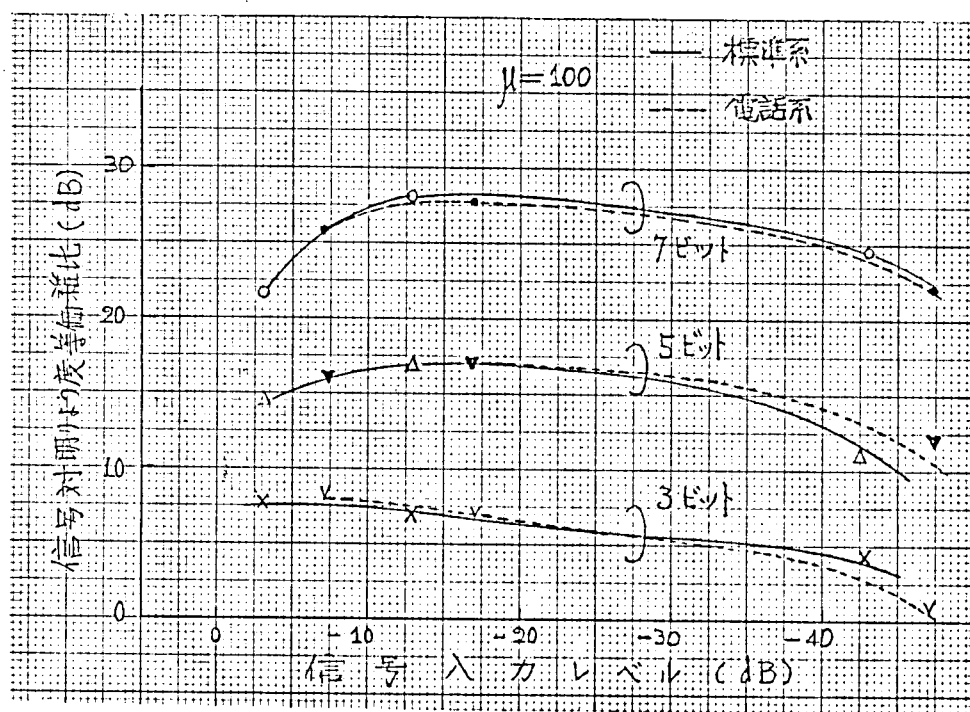


図3.7 信号入力レベルと信号対明りょう度等価雑音との関係

カレベルがこれより低下すると圧伸効果の限界に達し、信号対等価雑音比が漸次低下する。

一方、前節で述べた式(3.8), (3.9) および式(3.10)などの方法により、量子化ひずみ電力 D が信号入力レベルの種々の値に対して計算できる。この計算を7, 5, 3の各ビット数について行った結果を図3.8に曲線①, ①', ①''として1実鎖線で示す。

次に図3.8の理論曲線②はダイオードの理想特性からのずれを考慮した量子化ひずみ電力の計算結果を示すもので、その計算方法は次のような原理による⁽⁵⁾。

即ち前節の方法では圧伸特性は理想的な特性であると仮定して、圧縮特性

$$y = V \cdot \frac{\log_e(1 + \mu x/V)}{\log_e(1 + \mu)} \quad (3.2再)$$

を使ったが、実際にはこれにずれが生じて

$$y = V \cdot \left(\frac{\log_e(1 + \mu x/V)}{\log_e(1 + \mu)} + h(x) \right) \quad (3.11)$$

なる特性となる。まず簡単のために、式(3.2)において考慮した過負荷レベル V は1としても一般性を失わないから、式(3.2)の代りに圧縮特性が

$$y = \frac{\log_e(1 + \mu x)}{\log_e(1 + \mu)}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (3.12)$$

なる形で表わされたとする。この圧伸特性から計算された量子化ひずみ電力を D_0 で表わせ、ダイオードの不完全さにもとづく量子化ひずみ電力の D_0 からのずれを ΔD とおけば、信号対量子化ひずみ比 $[S/D](dB)$ は

$$[S/D](dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{S}{D_0 + \Delta D} = 10 \log_{10} \frac{S}{D_0} - 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\Delta D}{D_0} \right) \quad (3.13)$$

で表わされることになる。

(3.11)で $V=1$ とおいた圧縮特性を

$$y = \frac{\log_e(1+\mu x)}{\log_e(1+\mu)} + h(x) \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (3.14)$$

とおき、またこの逆特性を

$$x = \frac{1}{\mu} \left\{ (1+\mu)^y - 1 \right\} + f(y) \quad 0 \leq y \leq 1 \quad (3.15)$$

と表わす。量子化幅 Δx は、前節(3.4)と同様に考えて、式(3.15)から次のように求めら

$$\begin{aligned} \text{れる。} \quad \Delta x &= \left(\frac{dx}{dy} \right) \cdot \Delta y \\ &= \left\{ \frac{\log_e(1+\mu)}{\mu} (1+\mu)^y + f'(y) \right\} \cdot \Delta y = \left\{ \frac{\log_e(1+\mu)}{\mu} (1+\mu)^y + f'(y) \right\} \cdot \frac{2}{N} \end{aligned}$$

ただし N は量子化段階数である。この式に式(3.14)を代入し、また同時に

$$(1+\mu)^{h(x)} = 1 + k(x) \quad (3.16)$$

$$\text{および、} \quad f(y) = g(x) \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \text{とおけば、} \quad \Delta x &= \frac{2}{N} \left[A(1+\mu x) + g(x) + A(1+\mu x) \cdot k(x) \right] \\ &= \frac{2}{N} \left[A(1+\mu x) \right] + \frac{2}{N} \cdot F(x) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\text{ただし} \quad A = \log(1+\mu)/\mu$$

$$\text{および} \quad F(x) = g(x) + A(1+\mu x) \cdot k(x) \quad (3.19)$$

となり、これより D は次式のように計算される。

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{12} \int_{-1}^1 (\Delta x)^2 p(x) dx \\ &= \frac{2}{3N^2} A^2 \int_0^1 (1+\mu x)^2 p(x) dx + \frac{2}{3N^2} \cdot \int_0^1 [2A(1+\mu x)F(x) + \{F(x)\}^2] p(x) dx \end{aligned} \quad (3.20)$$

(3.20)のオ1項は D_0 、オ2項は ΔD である。すなわち

$$\Delta D = \frac{2}{3N^2} \int_0^1 G(x) p(x) dx, \quad G(x) = 2A(1+\mu x)F(x) + \{F(x)\}^2 \quad (3.21)$$

である。ずれの成分 $h(x)$, $f(y)$ から 式(3.16), (3.17)により $g(x)$, $k(x)$ を求め、(3.19)

により $F(x)$ を算出することにより、(3.21)から $G(x)$ および ΔD がただちに得られる。代表

的な圧伸器用ダイオード 1S306 についての計算例を 図3.8に曲線②として示す。

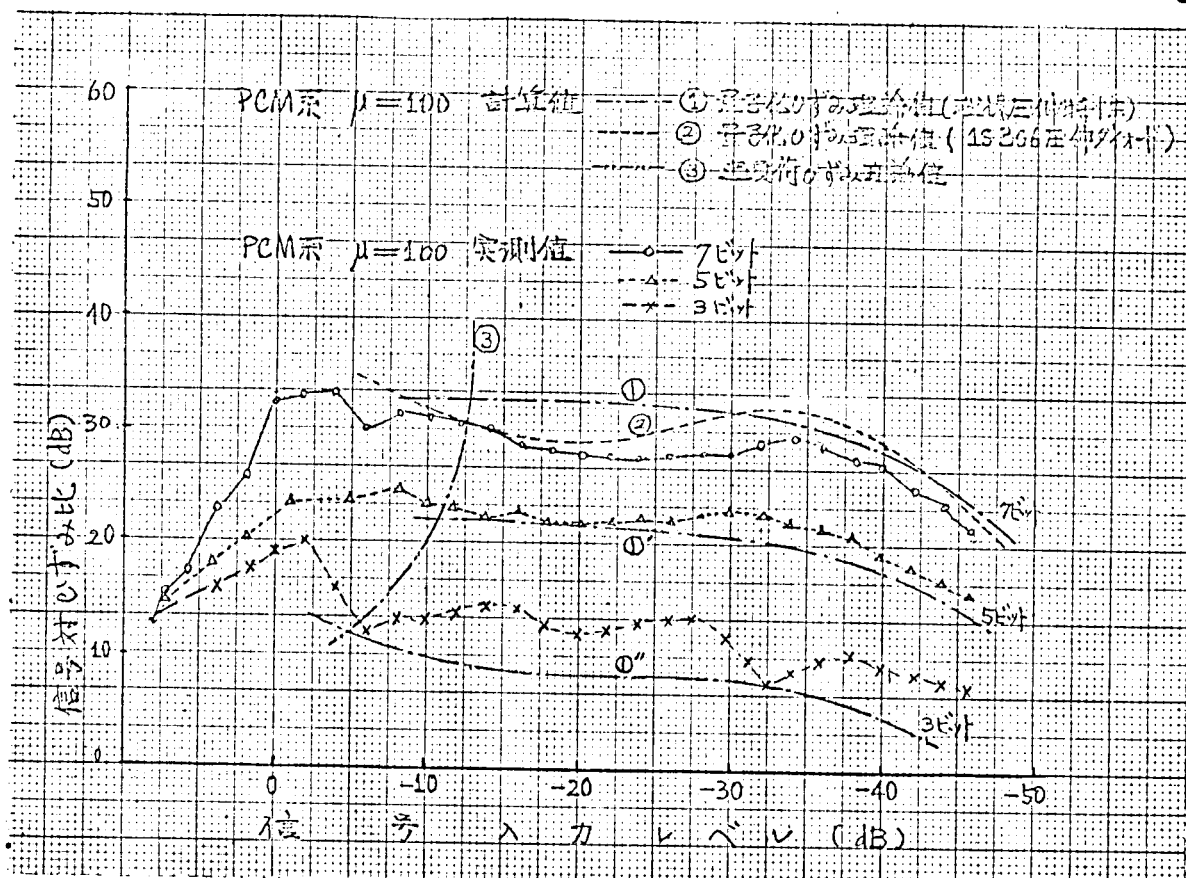


図3.8 信号入力レベルに対する 信号対量子化・過負荷ひずみ比の関係

図3.8における曲線③は過負荷ひずみの計算値であって、信号レベルが高くなるにつれて急激に S/D 比が減少するのがみられる。

図3.7を 図3.8と比較すると、図3.7の 明りょう度等価音レベルと 図3.8の 量子化ひずみ電力の 測定値あるいは 理論値①② との間には、大雑把に見積って、前節で みられたと同じように、やはり 3 dB 前後のずれがあると見なされる。しかし、信号レベルが -13 dB より上昇して 過負荷ひずみが発生すると、信号対過負荷ひずみ比の急激な低下にもかかわらず 信号対等価雑音の低下は はるかに少い。このように過負荷ひずみは量子化ひずみに比較して、品質におよぼす影響が著るしく異っており、これらの詳細な検討は、3.7 節において行う。

3.6 圧伸特性の影響 (6)

これまで扱ってきたのは、対数圧伸率 μ が100の場合であったが、本節では圧伸率の変化が等価雑音におよぼす影響をしらべる。図3.9は7ビットのPCM系に

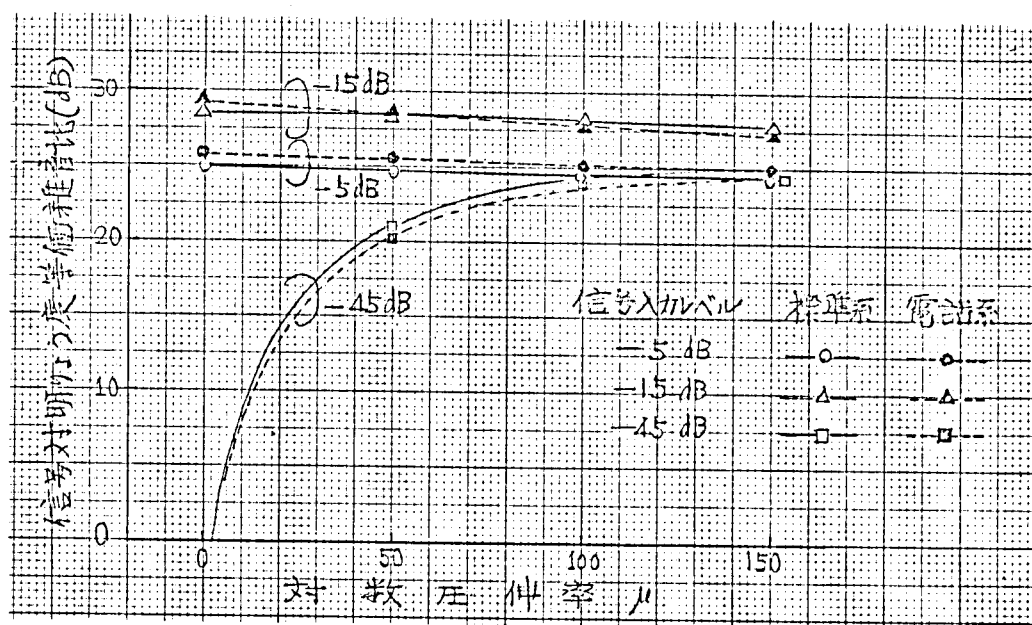


図3.9 圧伸率 μ に対する信号対明りよう度等価雑音比

おいて圧伸率の0から150迄の値に対する明りよう度試験の結果を等価雑音で表示したものであって、信号入力レベルがパラメータとなっている。図3.9によれば、信号入力レベルが-5, -15 dBの場合には、圧伸率が変わっても等価雑音はあまり変わらないが、入力レベルが低い場合には圧伸率の影響をいちじるしく受けることがわかる。したがって、入力レベルのいかんにかかわらず品質を劣化させないためには、 μ は100以上であればよいことが結論できる。なお、ここで述べた等価雑音の結果は、前節の場合と同様に、量子化ゆずみ電力と約3dBの平行移動の関係にある。

一般に圧伸特性と信号入力レベルとは密接な関係にあり、たとえ圧伸率が高いPCM系でも、信号入力レベルが低下すれば等価的な圧伸率は低下する。これは圧縮特性の式

$$y = V \left[\frac{\log_e \left(1 + \frac{\mu x}{V} \right)}{\log_e (1 + \mu)} \right] \quad (3.22)$$

からも容易に導かれる性質であって、信号入力レベルが低下すれば、これに比例して等価圧伸率は低下し、また当然等価なビット数も減少することがわかる。このことから、図3.7における信号入力レベルを変えた等価雑音の実験結果が、圧伸率とビット数を変えた実験と等価な意味をもつこと、また逆に、圧伸率やビット数を変えた実験結果から、上の実験結果を導きうることなどが結論できる。詳細は7.9節を参照されたい。

3.7 過負荷ひずみの影響⁽⁷⁾

PCM系においては過負荷レベルを越す信号波形は飽和し、過負荷ひずみが発生する。本節ではこのようなひずみの通話品質におよぼす影響について述べる。

過負荷ひずみは飽和によるひずみであるから、ひずみ周波成分の発生とともに信号出力レベルの低下をきたす。したがって出力波形のひずみの中には、レベル低下成分と等価雑音成分とが共存している。このような出力波形のひずみ電力の計算法としては、入力波形 $f(t)$ 、出力波形 $g(t)$ に対して、レベル低下に対応する適当な係数 a を定め、期待値

$$D(a) = \overline{[g(t) - a \cdot f(t)]^2} \quad (3.23)$$

を a について最小にするものを求めればよい。⁽⁸⁾ 式 (3.23) の定義をみたす a は

$$\frac{\partial D(a)}{\partial a} = -2 \cdot \overline{[g(t) - a \cdot f(t)] \cdot f(t)} = 0$$

$$\text{から } a = \overline{[g(t) \cdot f(t)]} / \overline{[f(t)]} \quad (3.24)$$

であり、したがって最小なる $D(a)$ の値は

$$D = \overline{[g(t)]^2} - \frac{[\overline{g(t) \cdot f(t)}]^2}{\overline{[f(t)]^2}} \quad (3.25)$$

であることが導かれる。式 (3.25) は過負荷ひずみのようなレベル劣化を伴うひずみに対して合理的な表現と考えられ、係数 a 、ひずみ電力 D はそれぞれ通話品質測定結果から導かれる等価レベル変化 α 、等価雑音 γ と対応している。ただしこの場合 a および D はそれぞれ dB 値に変換してあるものとする。

係数 a 、ひずみ電力 D の計算には音声のレベル分布が必要で、それには (3.6)

(3.10) を計算するのに用いた図 3.6 が利用できる。ここでは、計算に便利によ

うに，これを近似式で表現した．この近似式としては2つの異なる指数分布の和と

$$\begin{aligned} \text{して, } p(x) &= \beta [A_1 e^{-\alpha_1 x} + A_2 e^{-\alpha_2 x}] = \beta \left[\sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i x} \right] \\ &= \beta \{ 74.0 e^{-0.0536x} + 350.0 e^{-0.262x} \} \end{aligned} \quad (3.26)$$

図3形のものを用いた．S/D比を求めるとき β は消失するから，ここでは最初から $\beta=1$ とおいて計算することにする．

$$\begin{aligned} \overline{[q(t)]^2} &= \int_0^{\infty} q(x)^2 \left(\sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i x} \right) dx \\ &= \int_0^U x^2 \left(\sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i x} \right) dx + \int_U^{\infty} U^2 \left(\sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i x} \right) dx \\ &= \sum_{i=1}^2 \frac{2 \cdot A_i}{\alpha_i^3} \left[1 - (1 + \alpha_i U) e^{-\alpha_i U} \right] \quad (U: \text{過負荷レベル}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{[q(t) \cdot f(t)]} &= \int_0^{\infty} [q(x) \cdot x] \left(\sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i x} \right) dx \\ &= \int_0^U x^2 \left(\sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i x} \right) dx + \int_U^{\infty} U \cdot x \left(\sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i x} \right) dx \\ &= \sum_{i=1}^2 \frac{2 A_i}{\alpha_i^3} \left[1 - \left(1 + \frac{\alpha_i U}{2} \right) e^{-\alpha_i U} \right] \end{aligned}$$

$$\overline{[f(t)]^2} = \int_0^{\infty} x^2 \left(\sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i x} \right) dx = \sum_{i=1}^2 (2 A_i / \alpha_i^3)$$

であるから，これらを式(3.24)に入れて a が，式(3.25)に入れて D が求まる．この結果を図3.10に実線で示した．図3.10は四つの異なる過負荷レベルについて計算した結果であって，S/D比が著しく低いのが特徴的である．

一方，明りょう度試験結果から3.3節 図3.2(b)に説明した方法を用いて，等価レベル変化 α (dB)，信号対等価雑音比 S (dB) を求めることができる．得られた結果を同じく図3.10に実線で示す．図3.10の横軸は，計算で求めた係数 a ，および等価レベル変化 α であって，縦軸は信号対ひずみ比 および 信号対等価雑音比である．これらの曲線上に示したパラメータは入力信号レベル値であって，

同一信号入力レベルの点を一実線線で結び、 -5 dB から $+10\text{ dB}$ までの範囲を 5 dB とに表した。

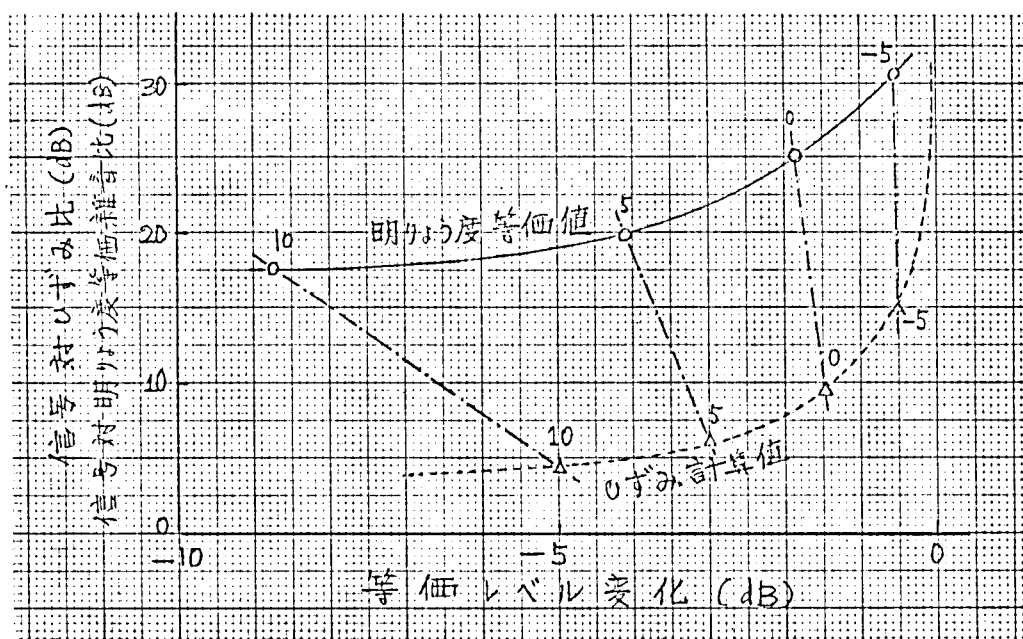


図3.10 等価レベル変化に対する信号対過負荷りずみ および信号対等価雑音比

図3.10から、等価雑音レベルはりずみ電力にくらべ常に 15 dB 程度低いレベルにあることがわかる。また等価レベル変化 α と係数 a の関係は、信号入力レベルが 5 dB 以下ならほぼ等しいが、信号入力レベルがさらに大きくなると一致しなくなり、通話品質の評価値が式(3.24)のような簡単なモデルでは表わせなくなる。一方 D と δ との間の 15 dB の差はかなり大きく、この理論的根拠などは将来に残された問題であるが、この差が一定であることはりずみの計算値から通話品質を知る上での簡単な関係として利用できる。

3.8 信号振幅部量子化の影響(8)

本節では、音声の高レベル部から発生した量子化のずれと、低レベル部から発生した量子化のずれが、通話品質の上で異なるかどうかを振幅量子化を部分的に行う操作によって検討した。

量子化を部分的に行う部量子化操作は、オ2章で述べたPCMモデル装置およびPCMレベル分離装置(オ2章、2.3節参照)と結合し、あらかじめ設定された二つの瞬時レベルの間に信号波形があるときだけ量子化操作をおこなう。それ以外はアナログ信号のまま伝送することによって実現される。試験回線の構成は標準系とし、量子化ビット数は5ビット均等量子化の条件を選んだ。零レベルはミッド・トレッド(平坦部の中点)に選んであるから、正・負それぞれ15ステップづつになり、3ステップごとに5等分し、それぞれの区画ごとに部量子化を行うこととした。各区画を仮にレベル帯域と呼び、低レベルから1区、2区、…、5区の記号を付した。また信号入力レベルを基準レベル(-13 dB)に選ぶことによって、すべてのレベル帯域に入力信号が入り、しかも過負荷が起らないことが確かめられている。

品質試験に先立って、部量子化操作を確認するためPCM系の部量子化のずれを歪率計で測定した結果を図3.11に示す。図3.11においては入力信号として正弦波を用い、各帯域ごとに部量子化のずれの実測結果を示した。図3.11においては、入力波形の尖頭値が帯域の下限に近づくとき急勾配でずれのS/N比が上昇している。上昇の位置から、各帯域の境界が推測され、ほぼ等分割の条件を満たしていることが確かめられる。

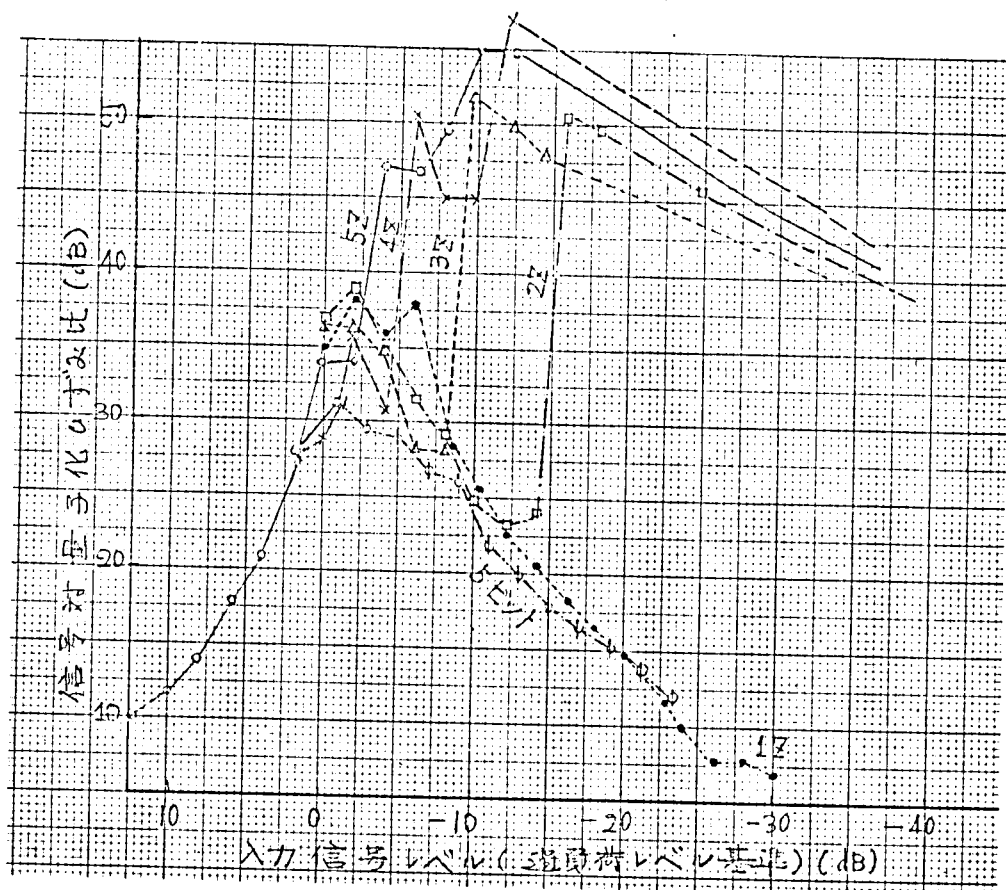


図 3.11 入力信号レベルに対する信号対部量子化のりずみ比

音声のレベル分布がすでに求まっているので、これから各分割帯域ごとの量子化のりずみを計算することができる。前節では音声のレベル分布近似式を式 (3.26)

$$p(x) = A_1 e^{-d_1 x} + A_2 e^{-d_2 x} \quad (3.26 \text{ 再})$$

として計算したが、こゝでは一つの量子化ステップ内では直線的变化

$$p(x) = p_1 - \frac{p_1 - p_2}{x_1} \cdot x \quad (3.27)$$

をするものとみなし、この仮定より 1 量子化ステップ内での量子化雑音が

$$S = S_1 + S_2 = \frac{1}{12} [p_1 + 3p_2] x_1 + \frac{1}{12} [p_3 + 3p_2] x_1 \quad (3.28)$$

であることを利用し、式 (3.26) から p_i を求めて各帯域ごとの量子化雑音を算出した。

この方法は 3.4 節の式 (3.6) を用いる方法よりもずっと精度が高くとれるが、式 (3.10) による直接的方法に比較すればやや精度が落ちる。この方法による計算結果を図 3.12 に実線で示した。

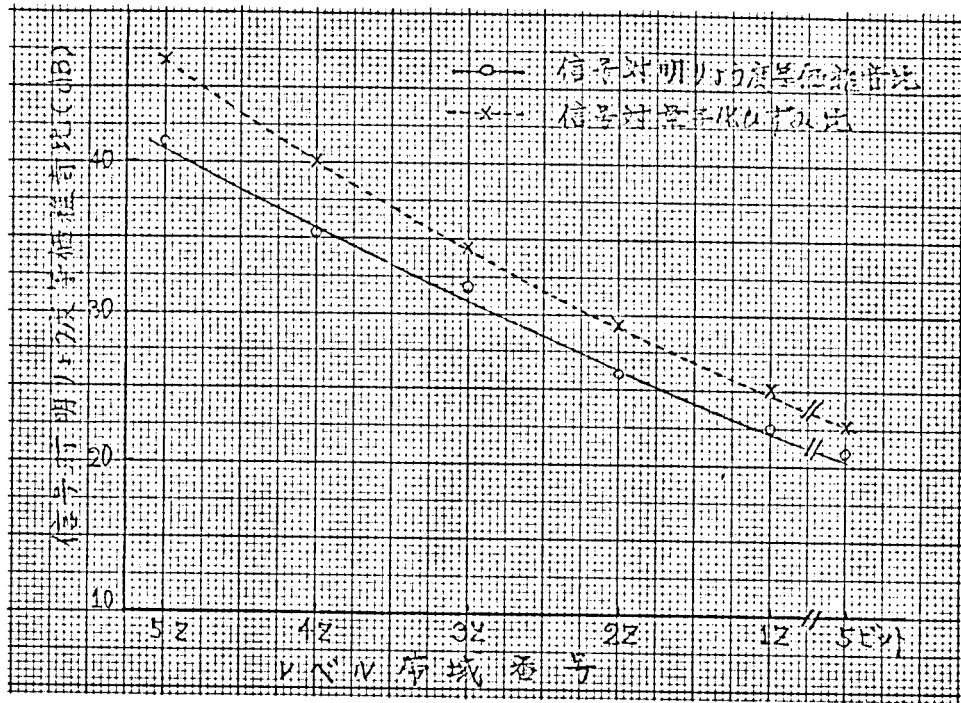


図3.12 部分量子化の量子化ひずみと等価雑音（5帯域分割）

図3.12には、横軸にレベル帯域番号が、また縦軸に信号対量子化ひずみ比および信号対等価雑音比が目盛ってある。図3.12によれば、ひずみと等価雑音との間にはどの帯域でもほぼ一義的の関係が成り立っており、帯域番号による違いはみられない。従って音声の高レベル部から発生したひずみと低レベル部から発生したひずみとは通話品質的に等質であって、これらが同量なら通話品質に与える影響は等しいといえる。

3.9 信号標本化周波数の影響

前節までの諸結果はすべて信号標本化周波数 8 kHz, 伝送帯域幅 3.6 kHz の場合であったが, 本節ではこれらをいろいろ変えて実験を行った結果について述べる。簡単のため信号標本化周波数を f , 伝送帯域幅を B で表わす。

量子化しずみの電力スペクトルはかなり広帯域であるため, 標本化により $f/2$ 以上の成分が折り返されて帯域内に入ってきている。この程度は f および B の組合わせによって異なるが, こゝではこれらの幾つかの値について実験を行った結果から等価雑音を求めた。その結果を表 3.1 に示す。表 3.1 によれば, f を 6 kHz,

標本化周波数; f , 信号伝送帯域幅; B

振幅ビット数 f	B	2.7 kHz	1.7 kHz	1.7 kHz
		6.0 kHz	4.0 kHz	8.0 kHz
7		28 dB	28 dB	—
5		17 dB	17 dB	22 dB

表 3.1 信号標本化周波数と信号伝送帯域幅の種々の組合せに対する信号対明りょう度等価雑音比

4 kHz と変えた時に B を比例的に変えてゆけば, 等価雑音は変わらないが, f と B の比が変われば等価雑音は変えることがわかる。この実験結果は, 量子化しずみの解析結果とも対応している。以上のことから, 標本化による影響はしずみのスペクトル折返し成分を考慮に入れた計算値と対応しており, 計算値から 3 dB 低くずらせば等価雑音の S/N 比が得られると結論される。

3.10 圧伸誤整合の影響⁽¹⁰⁾

3.10.1 はじめに

PCM 通信方式においては、信号の量子化ひずみの影響を減少させるため、符号器のまえに圧縮器を、復号器の後に伸長器をもちいるが、これらの間に完全な逆特性の関係が成り立たない場合には誤整合ひずみが生じ、これに伴って信号レベルの変化や量子化ひずみの増減などが生ずる。

圧伸器の誤整合は、圧伸器ダイオードの理想特性からのずれによって生ずるものと、圧伸器内部の利得のずれなどによって生ずるものに大別できる。前者は理想特性からの蛇行的なずれが主であって、商用の PCM 装置ではその影響は少いと考えられているのに対し、後者は圧伸率の等価的なずれをもたらし、特に低い信号入力レベルでは無視し得ない。ここでは後者のような等価的な圧伸率のずれによる誤整合が PCM 系の通話品質におよぼす影響を明らかにすることとを試み、圧縮器と伸長器のパラメータ（ここでは対数圧伸率）をいろいろに変えた誤整合の状態で明りよう度およびオピニオンによる評価を行った。

また一般に誤整合状態では、誤整合によって発生する波形ひずみのため通話品質が劣化するが、この劣化の程度を波形ひずみ電力と対応させ、両者の対応関係を明らかにすることが誤整合時の通話品質を明らかにする上で極めて重要なことと考えられる。ここではこの意味で誤整合時の通話品質測定条件に対応した波形ひずみ電力値その他のパラメータを計算によって求め、これらの値を通話品質測定から得られた諸量と比較し、対応関係を明らかにすることとを試みた。以下 3.10.2 項で誤整合時の波形ひずみの計算方法および計算結果について、3.10.3 項で曲

質評価結果について，3.10.4項で品質評価結果の伝送基準的観点からの検討結果について述べる。

3.10.2 誤整合による波形ゆずみ

本項では誤整合による波形ゆずみ電力ならびに誤整合時の量子化ゆずみ電力を計算および実測によって求める。以下3.10.2.1において誤整合によって生ずる波形ゆずみ電力の計算ならびに実測について，3.10.2.2において誤整合時の量子化ゆずみ電力の計算ならびに実測結果について述べる。

3.10.2.1 誤整合による波形ゆずみ電力

ここで計算に持ちこようとする波形ゆずみの定義は，3.7節において式(3.23)をもちいて説明したものと同じ定義である。すなわち，入力振幅 x ，出力振幅 z の波形ゆずみ電力 D とは，定数 a を適当に選んだときの期待値 $\overline{(z-ax)^2}$ の最小値であると定義する。たゞし $\overline{(z-ax)^2}$ は3.7節で述べたように x の出現確率を $p(x)$ として

$$\overline{(z-ax)^2} = \int_{-\infty}^{\infty} (z-ax)^2 p(x) dx \quad (3.29)$$

とあらわせる。たゞしこゝでは $|x| = U$ (過負荷レベル) で $p(x) \approx 0$ となるような U を選べば $p(x)$ はあらかじめ正負の平均をとって偶関数としてあるから，

$$\overline{(z-ax)^2} = 2 \int_0^U (z-ax)^2 p(x) dx \quad (3.29')$$

として計算してよい。式(3.24)，式(3.25)により

$$a = \overline{x \cdot z} / \overline{x^2} \quad (3.30)$$

$$D = \overline{z^2} - (\overline{x \cdot z})^2 / \overline{x^2} \quad (3.31)$$

である。

こゝで式(3.30)によって与えられる a は $\overline{(z-ax)^2}$ と最小にする x の係数とし

て定義された。これは z の波形ゆずみを求める場合、出力 z からゆずみに関係ない入力 x の a 倍の成分を差し引き残差が最小になるような a を求めることを意味しており、出力 z に含まれる入力 x の成分、 x に対する比、すなわち入力 x に対する出力 z のレベル変化分を表わしているといえることができる。従って a が 1 より大きい場合、すなわち a の dB 表現が正の場合には誤整合による波形ゆずみの中には入力が増幅された成分が含まれることになり、 a が 1 より小さい場合、すなわち a の dB 表現が負の場合には誤整合ゆずみの中には入力が減衰した成分が含まれていることになる。この a を誤整合ゆずみのレベル変化と呼ぶことにする。

いま圧縮率 μ 、伸長率 μ' の PCM 系の入出力特性を求めるため、圧縮器の入力を x 、出力を y 、伸長器の入力を y' 、出力を z とおき、符号器の量子化幅は十分に細かいものとする。3.4 節の式 (3.2), (3.3) から

$$y = \frac{\mu}{\log_e(1+\mu)} \log_e(1+\mu x/\mu) \quad (3.32)$$

$$\text{および } z = (\mu/\mu') \left[\text{Exp} \left\{ \log_e(1+\mu') \cdot y' \right\} - 1 \right] \quad (3.33)$$

が成り立つ。量子化は十分に細かいから、 y と y' の量子化ゆずみ分のみの差異は無視することが出来、したがって $y=y'$ とおいて式 (3.32), (3.33) から誤整合時の入力 x と出力 z の関係が

$$z = f(x) = \frac{\mu}{\mu'} \left[\left(1 + \frac{\mu x}{\mu} \right)^{r'} - 1 \right] \quad (3.34)$$

$$\text{のように求まる。ただし } r' = \log_e(1+\mu') / \log_e(1+\mu) \quad (3.34)'$$

である。

式 (3.30) より式 (3.31) を求めるには $p(x)$ が必要であるが、こゝでは式 (3.26) で $\beta=1$ とおいた

$$p(x) = A_1 e^{-d_1 x} + A_2 e^{-d_2 x} = 74.0 e^{-0.0536 x} + 350.0 e^{-0.262 x} \quad (3.35)$$

$$D = I_1 + I_1' - (I_3 + I_3')^2 / (I_2 + I_2')$$

のように，期待値の積が $p(x)$ の2項に対応して2項づきの対になることがわかり，しかも，この対 I_1 と I_1' ， I_2 と I_2' ， I_3 と I_3' は同じ形の式となる。 I_1 ， I_2 ， I_3 は次のように計算される。

$$I_1 = \int_0^U A_1 e^{-\alpha_1 x} \left(\frac{U}{\mu'} \right) \left[\left(1 + \frac{\mu x}{U} \right)^{r'-1} - 1 \right]^2 dx$$

$w = 1 + \mu x / U$ なる変数変換により

$$\begin{aligned} &= \int_1^{1+\mu} A_1 e^{-\alpha_1 \frac{U}{\mu'}(w-1)} \left(\frac{U}{\mu'} \right)^2 [w^{r'-1} - 1]^2 \frac{U}{\mu'} dw \\ &= A_1 e^k \left(\frac{U}{\mu'} \right)^2 \frac{k}{\alpha} \int_1^{1+\mu} e^{-kw} (w^{2r'} - 2w^{r'+1} + 1) dw \quad (\text{ただし } k = U\alpha/\mu) \\ &= \frac{A_1}{\alpha_1} e^k \left(\frac{U}{\mu'} \right)^2 \left[k^{-2r'} \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} u^{2r'} du - 2k^{-r'} \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} u^{r'} du + \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} du \right] \quad (3.36) \end{aligned}$$

同様に

$$I_2 = \int_0^U x^2 (A_1 e^{-\alpha_1 x}) dx = A_1 \left[\frac{2}{\alpha_1^3} (1 - e^{-\alpha_1 U}) - \left(\frac{2}{\alpha_1} + U \right) \frac{U}{\alpha_1} e^{-\alpha_1 U} \right] \quad (3.37)$$

同様に

$$\begin{aligned} I_3 &= \int_0^U x \cdot x \cdot A_1 e^{-\alpha_1 x} dx = \frac{A_1 U}{\mu'} \int_0^U \left[\left(1 + \frac{\mu x}{U} \right)^{r'-1} - 1 \right] x e^{-\alpha_1 x} dx \\ &= \left(\frac{U}{\mu} \right)^2 \left(\frac{A_1 U}{\mu'} \right) \int_1^{1+\mu} (w^{r'-1} - 1)(w-1) e^{-K(w-1)} dw, \quad w = 1 + \frac{\mu x}{U}, \quad u = kw \\ &= \left(\frac{U}{\mu} \right)^2 \left(\frac{A_1 U}{\mu'} \right) \int_1^{1+\mu} (w^{r'+1} - w^{r'} - w + 1) e^{-kw} dw \quad K = U\alpha/\mu \\ &= \left(\frac{U}{\mu} \right)^2 \left(\frac{A_1 U}{\mu'} \right) K^{-1} e^k \left[k^{-r'-1} \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} u^{r'+1} du - k^{-r'} \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} u^{r'} du \right. \\ &\quad \left. - k^{-1} \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} u du + \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} du \right] \quad (3.38) \end{aligned}$$

が得られる。

こゝで， I_1 ， I_3 の最終式(3.36)および(3.38)に現われる積分

$$I = \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} u^{2r'} du$$

は，不完全ガンマ関数 $\Gamma(a, x) = \int_0^x e^{-u} u^{a-1} du$ を用いると

$$\begin{aligned} I &= \int_k^{k(1+\mu)} e^{-u} u^{2r'} du = \int_0^{k(1+\mu)} e^{-u} u^{(2r'+1)-1} du - \int_0^k e^{-u} u^{(2r'+1)-1} du \\ &= \Gamma(2r'+1, k(1+\mu)) - \Gamma(2r'+1, k) \end{aligned}$$

と表わされる。こゝでは R.B. Whittlesey の方法⁽¹¹⁾によって一旦規格化不完全ガンマ関数

$$T_N(a, x) = \Gamma(a, x) / \Gamma(a)$$

を求め、しかるのちこれに $\Gamma(a)$ を乗じて $\Gamma(a, x)$ を求める方法をとった。一方レベル変化 a は I_3, I_3' と I_2, I_2' から

$$a = (I_3 + I_3') / (I_2 + I_2')$$

として求めることができる。

D および a を種々の (μ, μ') の組について計算した結果を図 3.13 に示す。図 3.13 では横軸に信号対誤整合いずみ比、縦軸にレベル変化 a とそれぞれ dB 値で目盛っている。図の結果から一般に $\mu > \mu'$ のときレベル変化の dB 値は正、 $\mu < \mu'$ のとき負となり、 $\mu = 0, \mu' = 150$ のとき負の最大値 -19 dB、 $\mu = 150, \mu' = 0$ のとき正の最大値 8.5 dB となることがわかる。また信号対誤整合いずみ比が 10 dB 以下では信号対誤整合いずみ比の劣化に比較してレベル変化の dB 値の方が劣化が大きいが、 10 dB 以上ではレベル変化の劣化は小さいといえる。

次に入力信号として正弦波をもちいて誤整合いずみの測定を行った。すなわち、PCM モデル装置の入力端に 900 Hz 正弦波を加えて、誤整合による出力信号のレベル変化ならびに信号対誤整合いずみ比を測定した。測定に当っては誤整合いずみ以外の影響を避けるため PCM 系のパラメータとして量子化いずみを無視し得る 10 ビットの条件を選んだ。測定結果からレベル変化を縦軸に dB 値で、信号対誤整合いずみ比を横軸に同じく dB 値でとって両者の関係を図 3.14 に表示する。

図 3.14 の結果は音声信号を入力とする図 3.13 の結果と比べていずみの発生量が一般に少ないが、これは正弦波信号のレベル分布が入力信号の両極値に集中しており、このため両極値以外でいずみが過少に現われるためである。なお本節の結果はのちに次節以下の結果と比較して論ずる。

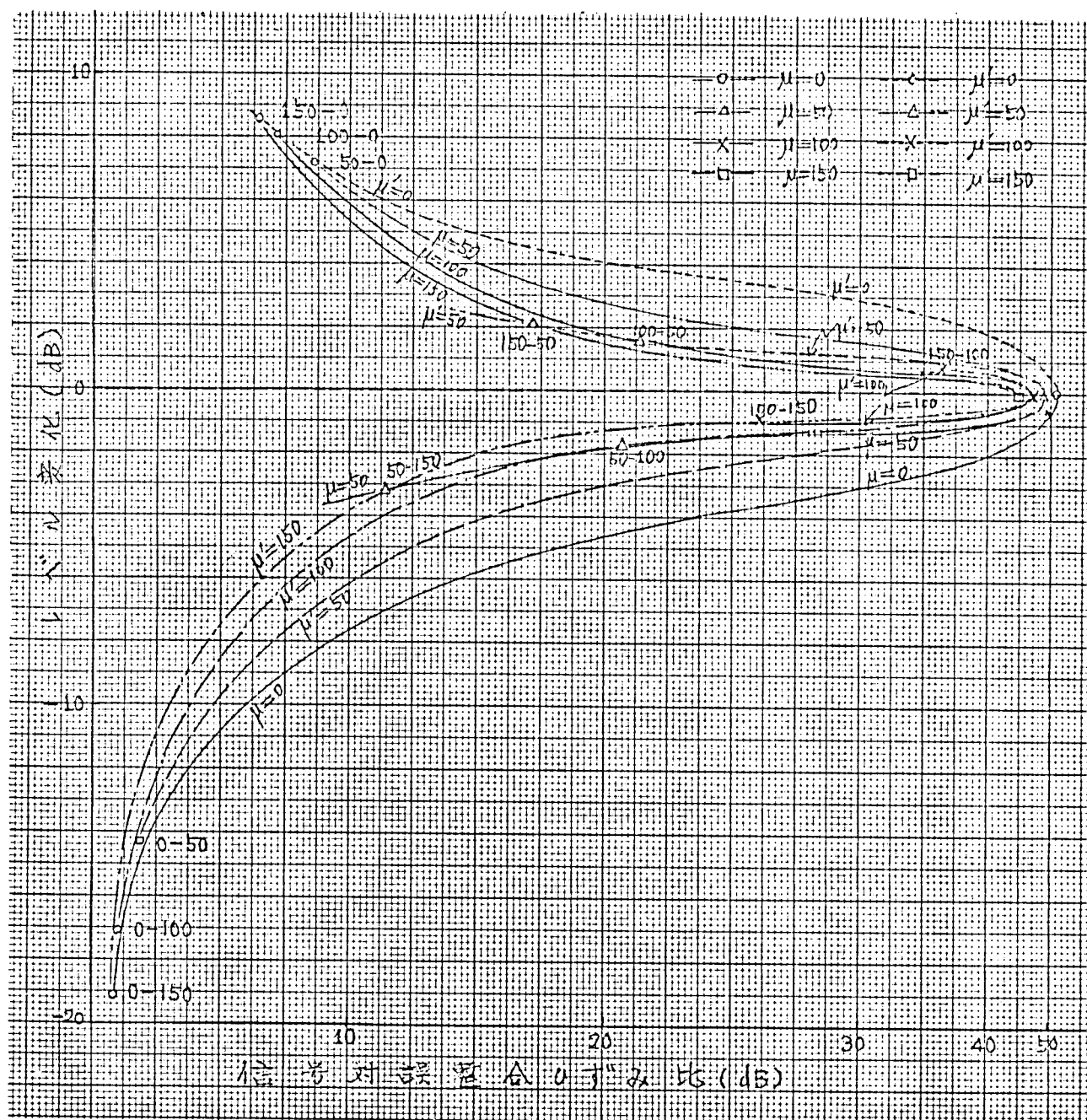


図3.13 誤整合によるレベル変化と信号対雑音比 (理論値)

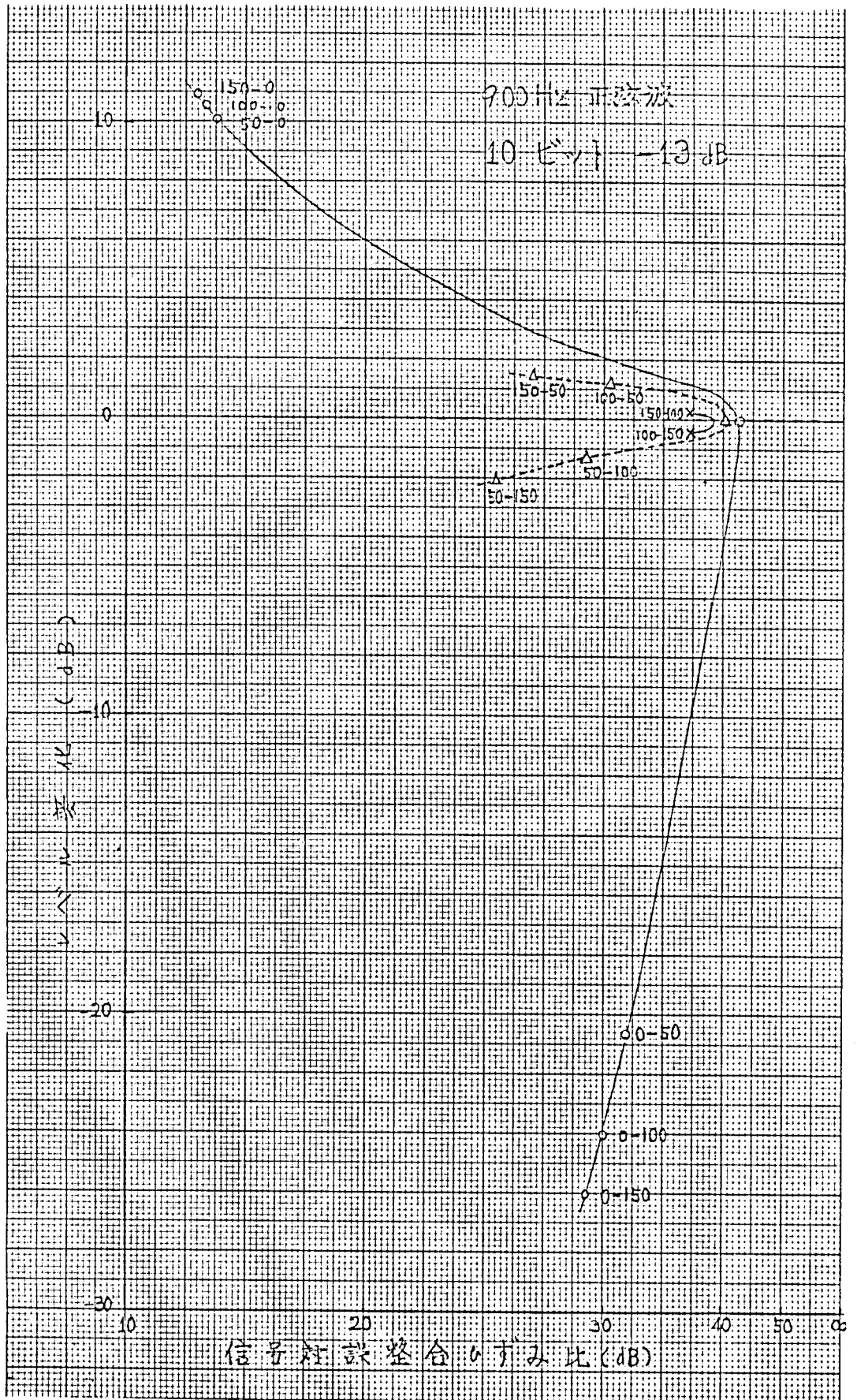


図 3.14 誤整合によるレベル変化に対する誤整合のすみ電力(測定値)
(PCM系 10ビット, 信号入力レベル-13 dB)

3.10.2.2 誤整合による量子化ゆずみ電力の変化

すでに 3.10.2.1 において量子化ゆずみと無視し誤整合のみによる波形ゆずみの存在する場合を扱って来たが、商用の PCM 系では必ずしも量子化ゆずみを無視し得るとは限らない。こゝでは量子化ゆずみ電力、誤整合状態における増減について考察する。

圧伸器の圧縮特性

$$y = U \log_e (1 + \mu x / U) / \log_e (1 + \mu)$$

において出力 y に均等量子化幅 $\Delta y = 2U/N$ で量子化が施されるから、これを入力側に換算すれば $\gamma = 2 \log_e (1 + \mu) / \mu N$ として

$$\Delta x = \gamma (U + \mu x)$$

なる形の非均等量子化が施されたことになる。こゝで、式 (3.34) で表わされる $f(x)$ なる非線形特性により、PCM 系の出力側における量子化ゆずみは

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{12} \int_0^U [\Delta x \cdot f(x)]^2 \cdot p(x) dx \\ &= \frac{1}{12} \int_0^U \gamma^2 (U + \mu x)^2 \left[\frac{d}{dx} \left\{ \frac{U}{\mu'} \left\{ \left(1 + \frac{\mu x}{U} \right)^{r'-1} \right\} \right\} \right]^2 p(x) dx \end{aligned} \quad (3.39)$$

となる。式 (3.35) より

$$p(x) = A_1 e^{-\alpha_1 x} + A_2 e^{-\alpha_2 x}$$

であるから J は

$$J = J_1 + J_2$$

の形に分離できる。式 (3.39) より J_1 は

$$J_1 = \frac{1}{12} \int_0^U \gamma^2 (U + \mu x)^2 \left[\left(\frac{\mu}{\mu'} \right)^{r'} \left(1 + \frac{\mu x}{U} \right)^{r'-1} \right]^2 A_1 e^{-\alpha_1 x} dx$$

となる。さらに $w = 1 + \mu x / U$ とおけば

$$J_1 = \frac{1}{12} \gamma^2 \left(\frac{\mu}{\mu'} \right)^{2r'} U^2 A_1 \int_1^{1+\mu} w^{2r'} e^{-\alpha \frac{U}{\mu'} (w-1) \frac{U}{\mu}} dw$$

となる。さらに $k_1 = d_1 U / \mu$, $u_1 = k_1 w$ とおけば

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{1}{12} \gamma^2 \cdot \frac{\mu}{\mu'^2} \cdot r'^2 \cdot A_1 U^3 e^{k_1} k_1^{-2r'-1} \int_{k_1}^{k_1(1+\mu)} u_1^{2r'} e^{-u_1} du_1 \\ &= \frac{1}{12} \gamma^2 \frac{\mu}{\mu'^2} r'^2 A_1 U^3 e^{k_1} k_1^{-2r'-1} \left\{ \Gamma(\overline{2r'+1}, k_1(1+\mu)) - \Gamma(\overline{2r'+1}, k_1) \right\} \quad (3.40) \end{aligned}$$

となり, $k_2 = d_2 U / \mu$, $u_2 = k_2 w$ とおく: とにより J_1' も同様:

$$J_1' = \frac{1}{12} \gamma^2 \frac{\mu}{\mu'^2} r'^2 A_2 U^3 e^{k_2} k_2^{-2r'-1} \left\{ \Gamma(\overline{2r'+1}, k_2(1+\mu)) - \Gamma(\overline{2r'+1}, k_2) \right\} \quad (3.41)$$

として求める。結局式(3.40)と(3.41)を加えることにより J が求められることになる。

J を μ, μ' のいろいろな組合せについて計算した結果を図3.15に示す。ただし図3.15において $\mu=0$ は計算の都合上 $\mu=1$ で代用してある。また、縦軸の値は出力信号に対する量子化ひずみ電力の比であって、誤整合によって生ずる出力信号レベルの変化を考慮してある。図3.15の結果から、誤整合時の量子化ひずみ電力は誤整合ひずみ電力に比較して一般に小さい値となっているので、量子化ひずみが全体のひずみに占める割合はこの場合を以て大きくないことがわかる。

誤整合時の波形ひずみ電力は誤整合ひずみ電力と量子化ひずみ電力の和と考えられるから、これは図3.13の計算結果と図3.15の計算結果とを加えることによって求めることができる。しかしこの両者の通話品質に及ぼす影響にはかなり大きな相違があり、また相乗効果のある場合も考えられるので、全ひずみ電力が求まってもこれから通話品質に及ぼす影響をたぐちに予測することは困難である。ここで得られた結果と通話品質測定結果の比較については3.10.3項で述べる。

さて、3.10.2.1で行ったと同様な方法により、量子化ひずみの無視し得ない7ビットの場合についてPCMモデル装置を用いて信号対波形ひずみ比を測定し、上

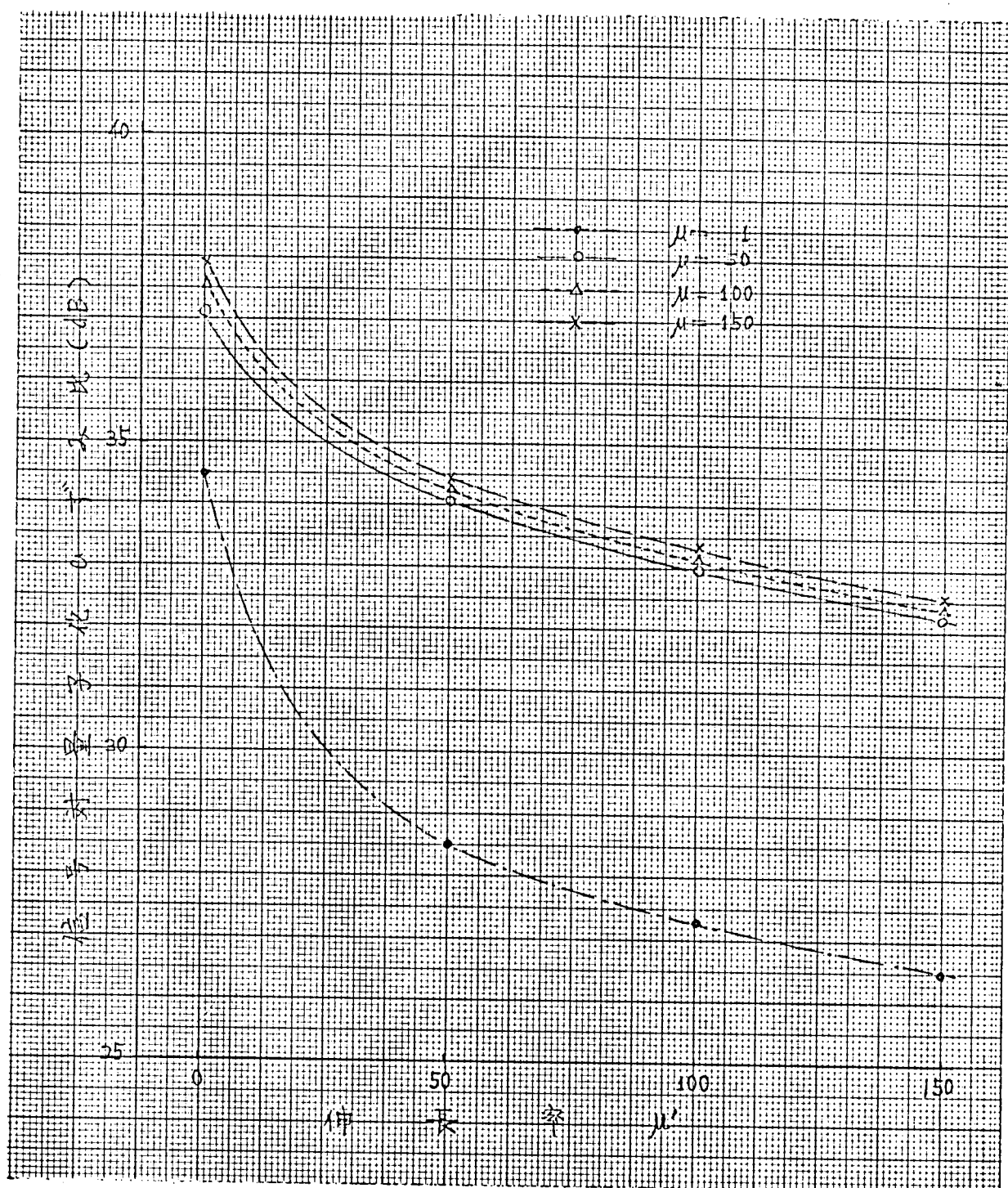


図 3.15 誤整合による量子化ムズみの変化(理論値)
(PCM系 7ビット, 信号入力レベル -13 dB)

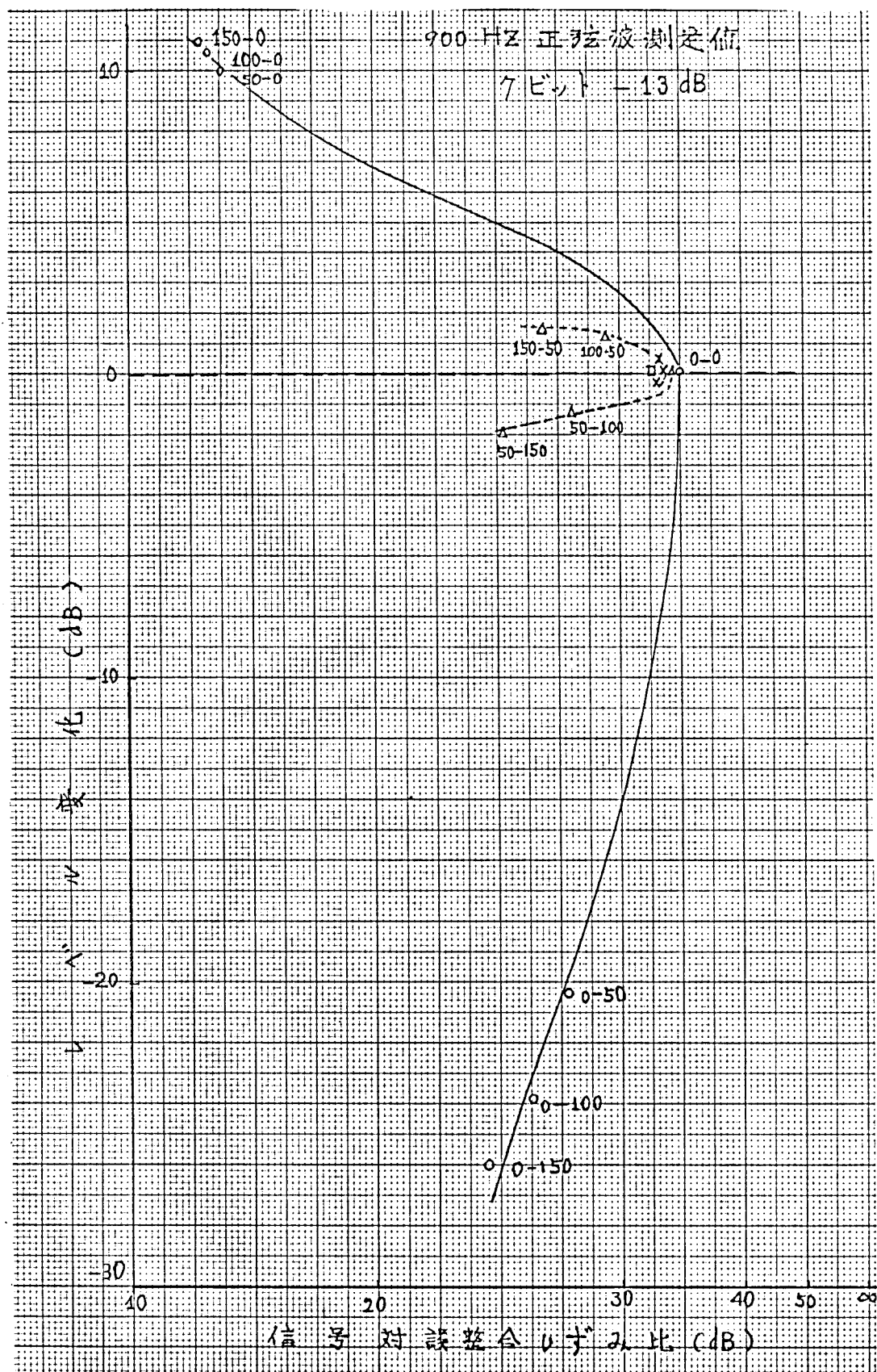


図3.16 誤整合によるひずみ電力とレベル変化(測定値)
(PCM系7ビット, 信号入力レベル -13 dB)

記の計算結果と比較することとを試みた。測定結果を図3.16に示す。図3.16を図3.14と比較すると、 $\mu=0$ の場合に約4dBのS/D比の低下がみられ、またS/D比の上限が34dB程度に低下している。このようなS/D比の低下は、図3.15に示めた信号対量子化ノイズ比の値からみて、誤整合による量子化ノイズの増大への影響起因するとみなすことが可能である。換言すればこのことは誤整合ノイズが量子化ノイズと独立であって、総合のノイズ電力は両者の電力和として与えられることを意味しているものと考えられる。

3. 10. 3 誤整合ひずみのある PCM 系の品質評価

本項では PCM 系の誤整合ひずみが通話品質におよぼす影響を、通話品質尺度として明りょう度およびオビニオンの両尺度を用いて測定した結果について述べる。オビニオン尺度は対象となるものの品質を主観的判断に基づいて 5 段階の範ちゅうにクラス分けし、各範ちゅうの評定の平均値を最終評定値とする尺度であって、その詳細についてはオク章を参照されたい。

通話品質の測定は図 2.4 に示した日本主通話標準装置を用いた標準通話系試験回線により行った。このとき測定に用いた PCM 装置は PCM モデル装置である。

3. 10. 3. 1 10 ビットの場合

ここでは量子化ひずみの無視できる 10 ビットの場合の測定結果を述べる。品質測定結果から、明りょう度およびオビニオン両尺度の等価レベル変化と等価雑音を誘導し、図 3.17 にしめす。

まず、明りょう度の結果とひずみ計算値(図 3.13)と比較すると、(0, 150)の場合には信号対明りょう度等価雑音比が信号対ひずみ比よりも約 10 dB 高く、(150, 0)の場合には 20 dB 以上も高いことがわかる。(150, 0)のこのような結果は過負荷ひずみにおいてみられた結果と合わせて考えると、ひずみがこのように上に凸な非線形特性で表わされる場合には信号対明りょう度等価雑音比が信号対ひずみ比より著しく高いこと、すなわち明りょう度におよぼす影響はひずみ電力から予想されるよりもずっと小さいことを意味している。この理由は、上に凸な非線形特性が音声の零レベル近辺を増幅する性質があるので、音韻性を失う程度が小さいことによるものと考えられる。(150, 50)の結果についてもほぼ同様の結論が導かれる。

一方オビ=オンの結果については、明りょう度とや、異なる傾向がみられる。すなわち誤整合いずみの極度に大きい $(150, 0)$ および $(0, 150)$ の場合には、明りょう度に比べて信号対等価雑音比が約 18 dB 低く、この値は図3.13の S/N 比に近い。一方誤整合いずみが比較的小さい $(150, 50)$ および $(50, 150)$ の場合にはオビ=オンの結果は逆に甘くなっており、結局明りょう度とオビ=オンの間にはいずみの小さい場合には前者が、いずみの大きい場合には後者が、それぞれの評価において相対的に他よりきびしい評価を与える関係のあることがわかる。

次に図3.13の結果と図3.17の結果を直接比較することとし、レベル変化の比較結果を図3.18に、いずみ電力と等価雑音との比較結果を図3.19に示す。

まず図3.18では横軸にレベル変化の計算値を、縦軸に品質測定から導かれた等価レベル変化を示してある。誤整合の大きい $(0, 150)$ 、 $(150, 0)$ の条件では測定値(縦軸)の方がやや大きい値をとっているが、両者の差はあまり大きいものではなく、 $(50, 150)$ 、 $(150, 50)$ の条件では両者はほぼ等しい。結局全体的に見て、計算値と実験値は比較的良好に一致しているといえる。

図3.19では信号対いずみ比計算値を横軸に、信号対等価雑音比実測値を縦軸にとって両者の直接比較を行っているが、この結果から信号対等価雑音比が信号対いずみ比計算値より常に大きいことがわかり、この程度は明りょう度では $\mu > \mu'$ のとき、オビ=オンでは $\mu < \mu'$ のときに特に顕著である。このように明りょう度とオビ=オンで相対的な評価が逆転する現象は、この両尺度が品質のかなり異った要素に着目していることを意味しており、波形いずみの通話品質尺度としては他の尺度による評価結果を併用する必要があると考えられる。この点についてはオ7章を参照されたい。

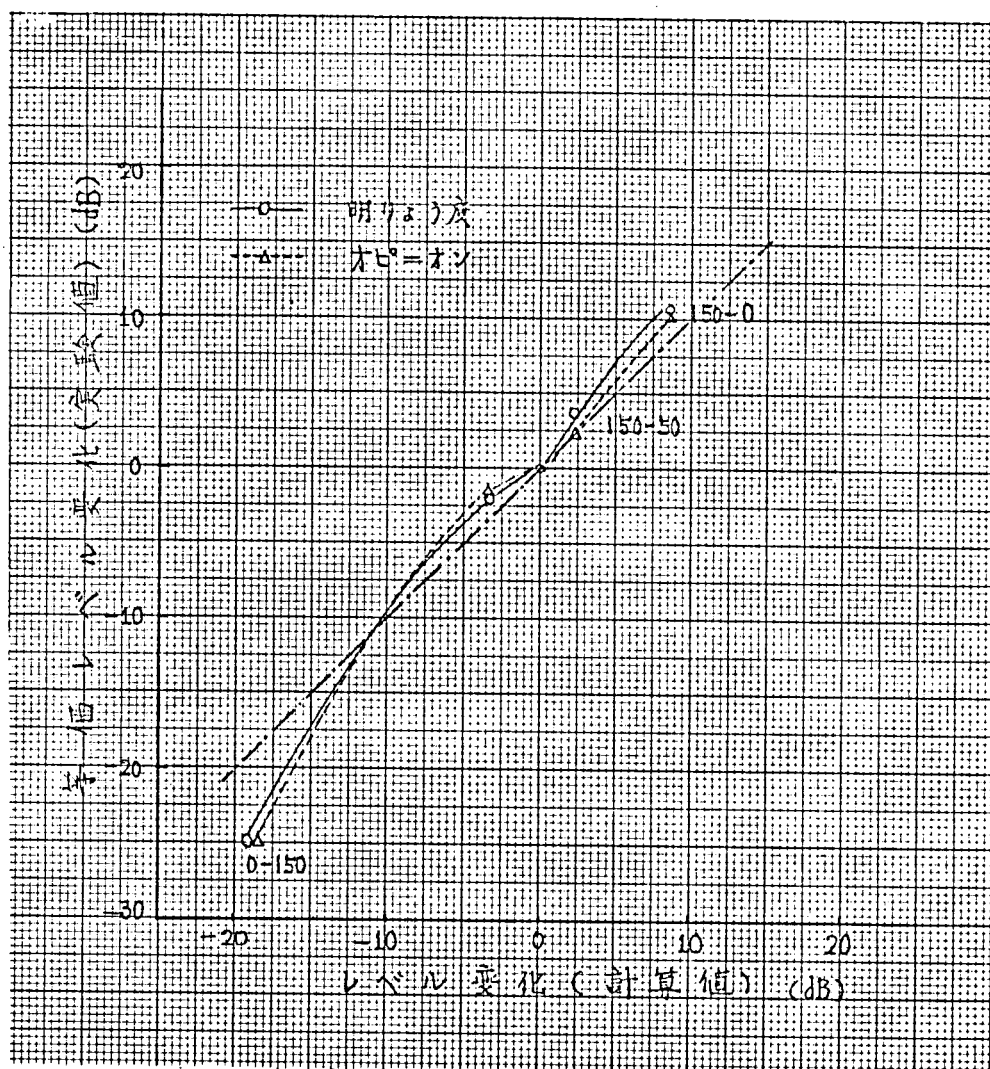


図 3.18 レベル変化についての 計算値と実験値との 比較

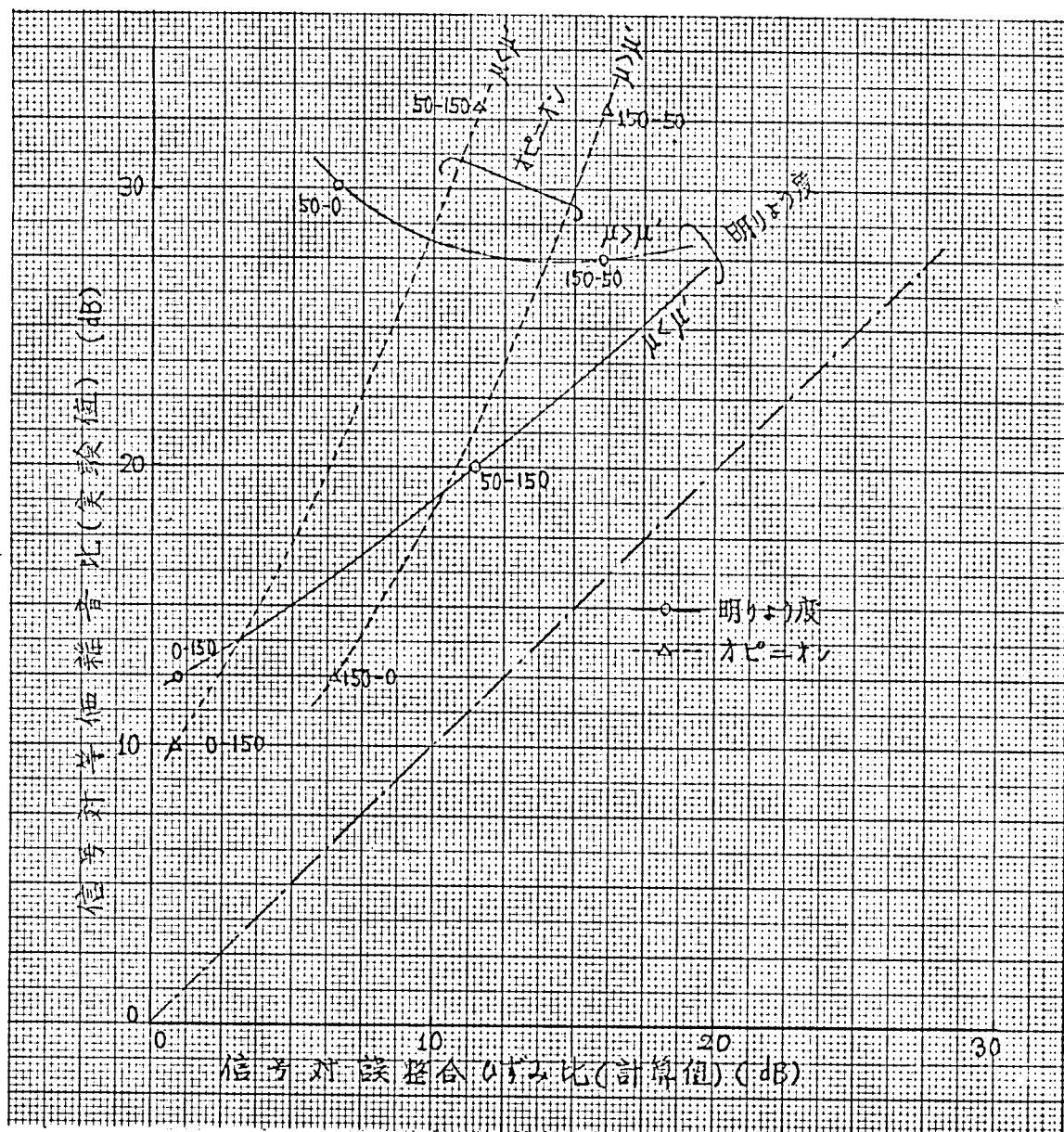


図3.19 誤整合のずみ電力と等価雑音電力の比較

3.10.3.2 7ビットの場合

さきの 3.10.3.1 では、量子化誤差を無視することのできる 10ビットの場合について誤差整合誤差の影響を明らかにしたが、ここでは量子化誤差を無視することのできな 7ビットの場合について通話品質を測定した。測定結果から等価レベル変化および信号対等価雑音比を誘導し、その結果を図 3.20 に示す。

図 3.17 の 10ビットの場合と比較して図 3.20 の結果の特徴を列挙すると次の3点となる。

- (1) $(0, 0)$ の条件において、明りょう度、オピニオンともに S/N 比の低下がみられ、オピニオンにおいて甚く明りょう度においてきびしい評価となっているが、これはすでに誤差整合のない場合にみられた結果と一致している。
- (2) $(150, 0)$ の条件において、明りょう度による信号対等価雑音比が 10ビットの場合より約 3dB ほど低くなっており、この結果は図 3.15 の計算結果による量子化誤差の影響を上廻るものである。したがってこの場合量子化誤差と誤差整合誤差には何らかの相乗効果を生じているものと考えられる。
- (3) $(150, 50)$ の条件についても上と同様の現象がみられ、相乗効果が生じていることが推察される。

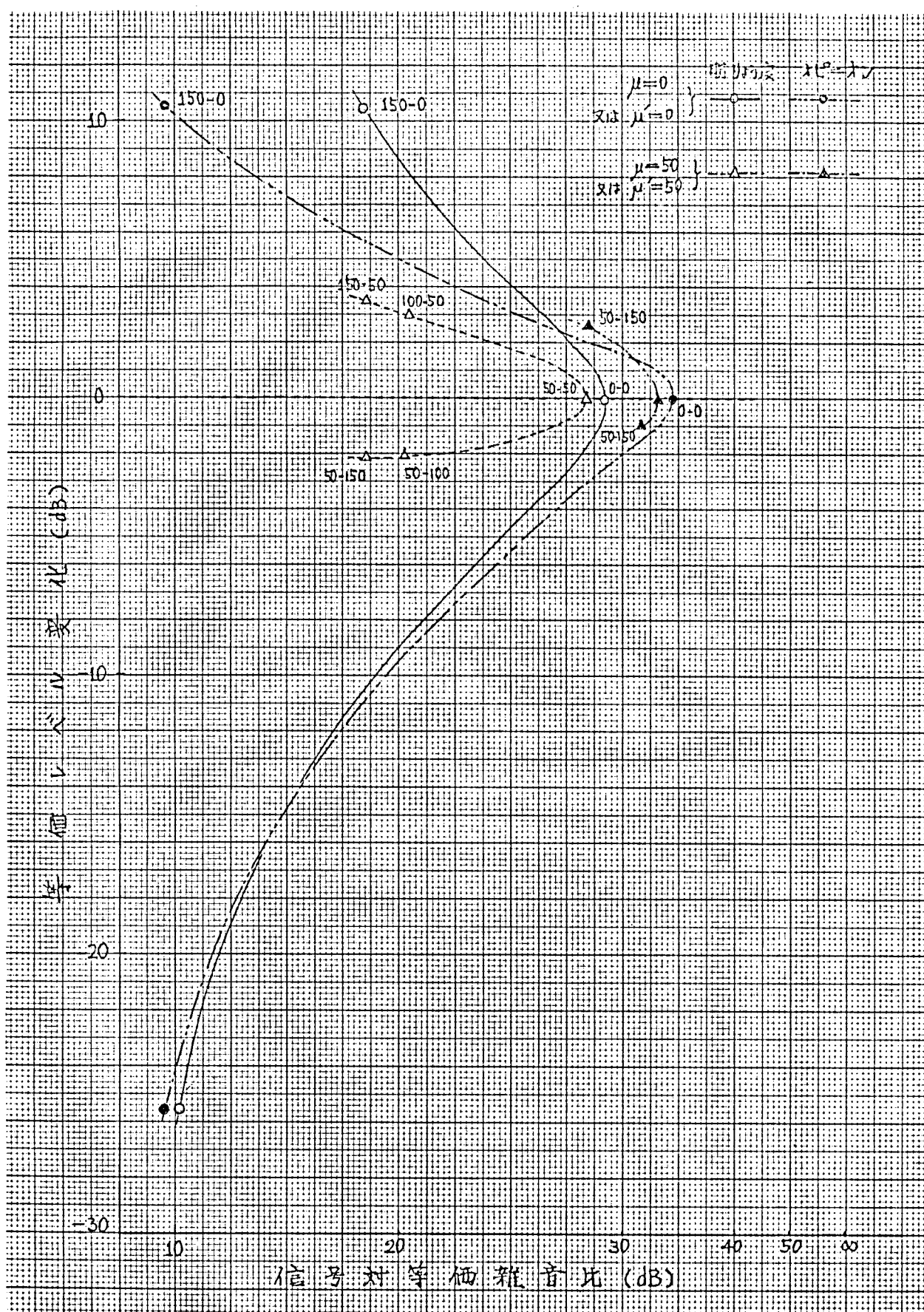


図3.20 誤整合による等価レベル変化と等価雑音
(PCM系 7ビット, 信号入力レベル-13 dB)

3.10.4 誤整合による品質劣化

前項まで PCM系の誤整合による通話品質を等価レベル変化と等価雑音の2元的表現法によって評価してきたが、本項では通話品質を電話伝送基準で規定される限界電話通話系の AEN 変化分によって評価することを試みた。

図3.21は振幅量子化ビット数7ビット、信号入力レベル -13 dBのPCM系について μ' と μ の30%だけ μ から低下した値から、同じく30%だけ μ より増加した値の範囲で種々の値をとるとき品質劣化量を求めたものであって、横軸は μ' の変化値すなわち $\{(\mu' - \mu) / \mu\} \times 100$ (%), 縦軸はAEN変化量(dB)である。

図3.21に示すようなPCM系の誤整合による品質劣化量は、その大部分が誤整合によるレベル変化に起因するものであって、したがって $\mu' > \mu$ のとき品質劣化量が正、 $\mu' < \mu$ のとき品質劣化量は負(品質向上)となっている。この結果からたとえば上記の $50 \leq \mu \leq 150$ のPCM系においては、 μ' の変化範囲が整合状態($\mu' = \mu$)の30%以内であれば品質劣化量は1dB以下となり、電話系に見込まれているレベル変動による品質劣化分を下廻ることがわかる。

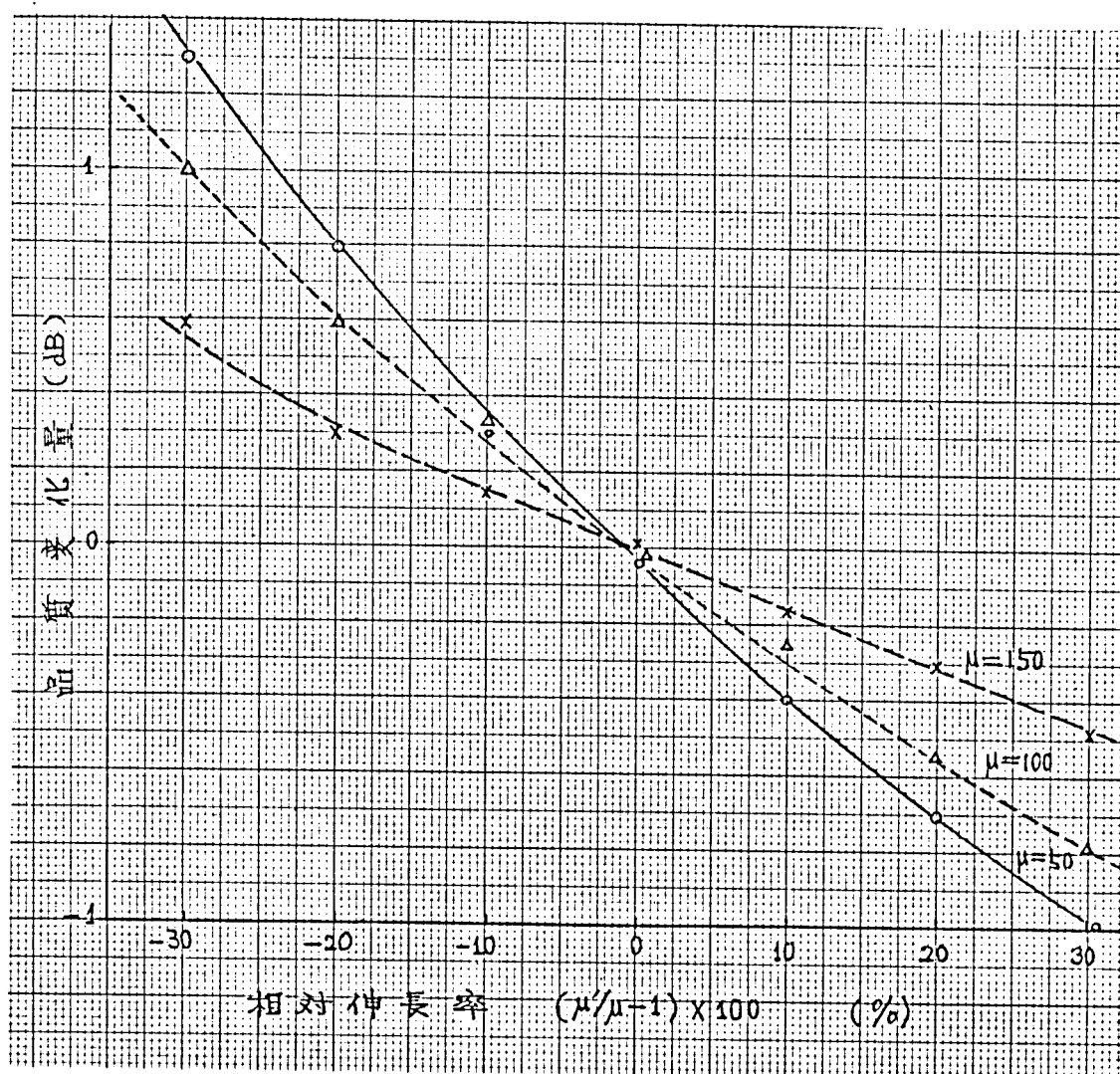


図3.21 相対伸長率と品質変化量との関係
(クビット, 信号入力レベル -13 dB)

3.10.5 まとめ

以上，圧伸器の誤整合にもとづく波形ひずみ，諸性質とその通話品質におよぼす影響を誤整合の各条件について明らかにした。

まず 3.10.2 で，誤整合にもとづく波形ひずみ電力ならびに誤整合が量子化ひずみ電力におよぼす影響を計算ならびに正弦波による実測によって求めた。次に 3.10.3 では，明りょう度およびオビニオン尺度をもちいた品質評価結果から等価レベル変化ならびに等価雑音レベルを誘導し，これを 3.10.2 の計算結果と比較して上にいちぢるしく凸な場合の誤整合ひずみが明りょう度では非常にあまく，オビニオンではやゝきびしい評価を受ける性質のあることを見出した。また計算結果と品質測定結果とを総合的に比較することにより，計算にもちいた波形ひずみの定義式 (3.30)，(3.31) から品質測定値を予測するためには，これらの定義式にさらに基本的な修正を加えることが必要なことがわかった。また量子化ひずみとの相乗効果については多くの場合無視できるが，上に凸な特性の場合には若干の相乗効果による補正が必要であることがわかった。最後に 3.10.4 で，誤整合による通話品質の変化を，限界通話系の AEN 変化分に換算して評価することを試み，その結果 μ' が μ の 30% 以内の範囲にあれば，誤整合による品質の変化は 1 dB 以下に止まることが明らかとなった。

3.11 結論

本章では、波形ひずみの影響をすべて直通系の線路雑音におきなおして評価することにより、PCM系における各種の基本パラメータの通話品質におよぼす影響を明らかにして来た。

本章で扱った PCM 系の波形ひずみは

- ① 振幅量子化による波形ひずみ (3.4, 3.5, 3.6, 3.8 の各節) およびその標本化による効果 (3.9 節)
- ② 過負荷ひずみ (3.5, 3.6 の各節)
- ③ 誤整合ひずみ (3.10 節)

の 3 種である。本章の各所において誘導または計算したこれらの波形ひずみ電力値(A)と、明りょう度等価雑レベル(B) との間の相互関係は

① 量子化ひずみでは $A \approx B$ A と B はほぼ等しいが、B の方がやや大きい

② 過負荷ひずみでは $A \gg B$ A は B よりかなり大きい。

③ 誤整合ひずみでは $A \gg B$ (時に $A > B$) ... A は B よりかなり大きい。

であって、①② では A, B の間には、同一種類のひずみ内においては、ほぼ単純で一義的な関係にあるとみなし得るが、すべての種類の波形ひずみについては一義的な相互関係にあるとはいえない。

このことは、波形ひずみ電力 D およびレベル変化量 A の定義が、必ずしも品質面における等価雑音 δ およびレベル変化量 α と一義的に対応しないということである。

あつて、品質上の諸性質に対した波形ひずみの表現法を導くためには、波形ひずみの電力値そのものだけでなく、波形ひずみの電カスペクトルなども考慮に入れるなどして、もっと複合的な要素から構成する必要があると考えられる。波形ひずみの電カスペクトルを考慮した明りょう度等価雑音レベルの予測についてはオ5章に詳しく述べる。また、明りょう度以外の幾つかの補助的尺度による等価雑音についてはオ7章に述べる。また、本章でとり扱はなかつた線路雑音と量子化雑音との共存時の品質、符号誤りによる波形ひずみの品質、および量子化ひずみが、縦続接続されたPCM系で相加してゆく場合の品質については次章で取扱う。

第4章 商用電話系の諸要因の品質評価⁽¹⁾⁽²⁾

4.1 概論

商用電話系では信号伝送過程において、伝送線路雑音その他の種々の雑音成分が加わる。これらの雑音は、それが加わる部分によって2つの種類に大別できる。すなわち、加入者線からPCM系入力までの、主として加入者線路に加わる線路雑音と、PCM系の符号中継伝送区間に加わる中継線路雑音の二つである。

前者は、音声波形に重畳して伝送されるので、PCM系によって音声波形とともに量子化・符号化・中継伝送・復号化の諸過程を経て波形伝送され受話者の耳に達する。したがって、雑音と音声の重畳された成分に量子化ひずみが加わることになり、線路雑音と量子化ひずみの相乗効果が発生すると考えられる。このような相乗効果は品質をより劣化せしめる影響をもつかどうか、その影響の性質および程度を等価雑音など前章で用いた方法を適用することによってしらべることが可能である。

また一方、後者のPCM系の符号中継伝送過程において生ずる雑音は、PCM系の符号パルスに誤符号を生ぜしめる原因となるので、誤符号率と誤符号によって生ずる波形ひずみとの関係およびこの波形ひずみの通話品質におよぼす影響をしらべることが必要となる。

本章では、3.2節においてPCM系入力端以前の音声波形に線路雑音が重畳する場合の線路雑音の影響をしらべ、また3.3節において、中継伝送路の符号誤りが通話品質におよぼす影響をしらべた。

一方、商用電話系では種々の加入者線種を用いることがあり、それぞれの加入者線においては、さきに述べた線路雑音の他に反射係数など種々の伝送線路系の

ひずみが存在するので、加入者線種の差によって、量子化ひずみと相乗効果に差異が生ずることも考えられる。

また、商用電話系は複雑な電話回線網を構成しており、PCM伝送系がこの回線網の中に組み入れられると、回線構成上の都合によっては一つの通話ルートの中にPCM系が何リンクも連続接続され、量子化ひずみがこのルート中で連続に重畳される場合が生じ得る。この場合にも、量子化ひずみの連続相加による相乗効果が生ずる懸念がある。

まず、さきに述べた加入者線種のひずみについては、数種類の加入者線種を選んで、電話通話系試験回線（第2章、2.1節）について測定した結果からめん密な等価雑音の誘導を試み、PCM系を含まない電話系による結果との比較を行ったが、すでに基本パラメータの品質評価の章で明らかにされた量子化ひずみの影響のみが見出され、加入者線種の差による等価雑音レベルの差は見られなかった。このことは、加入者線のひずみが線形のひずみであって、量子化雑音の間には相乗効果を生じないことを意味しており、このことはまた、電話機を含まない標準系試験回線における等価雑音が電話系試験回線における等価雑音とほぼ等しいという前章の結果からも導き得る結論である。これらのことを考慮して、本章では加入者線種の差による影響については項目を設けなかった。

一方、後者の多リンク接続の通話品質におよぼす影響は、伝送基準上極めて重要であって、本章では4.4節に詳細を述べたが、伝送基準上の検討については、最終章にまとめて述べる。

4.2 線路雑音の影響⁽³⁾⁽⁴⁾

こゝでは商用電話系における線路雑音の影響について調べる。雑音が重畳した音声と量子化すると、その出力には通話妨害成分として音声のひずみ成分と雑音の量子化された成分などが現れる。これらは明りょう度を劣化させるので、明りょう度測定結果から明りょう度等価雑音が誘導できる。この明りょう度等価雑音から入力雑音成分と差し引けば、雑音が重畳した音声を量子化することによるひずみ成分の等価雑音だけが残る。図4.1はクビット $\mu=100$ の場合について上記の手続きで求めた等価雑音を示したものである。信号入力レベルが -13dB と

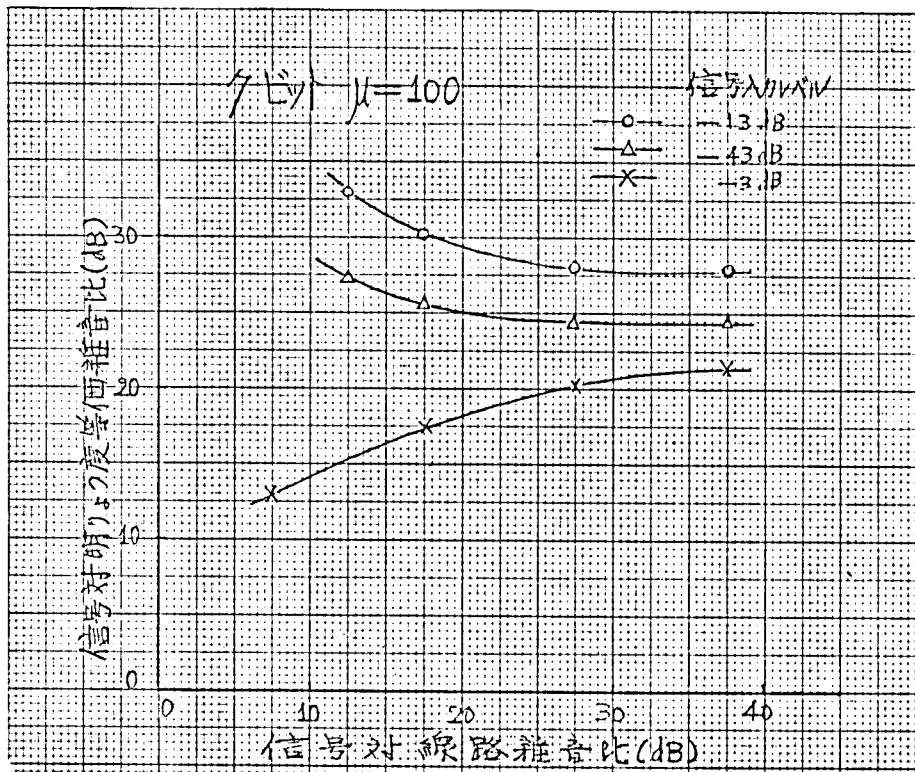


図4.1 線路雑音の影響

-43 dB の場合には 20 dB あたりを境にして それより小さい 信号対雑音比では右下り、大きいときには平坦となっている。平坦部分の等価雑音レベルは、雑音のない時の量子化ひずみの等価雑音レベルに一致する。この平坦部分は線路雑音の相乗効果が現れない部分であり、右下りの部分はそれの現れた部分であって、雑音が多くなればなる程、量子化ひずみそのものの影響を弱めようとする方向に効果が効らくことがわかる。従って、信号対線路雑音比が 25 dB 以上のときは、入力雑音レベルと量子化ひずみの等価雑音とを電力和によって総合の等価雑音レベルが求められる。これより雑音が多くなると、線路雑音と量子化ひずみとの相乗効果が現れるが、実際には量子化ひずみの占める割合は極めてわずかであって、この効果はほとんど無視してよい。従ってこれらの諸結果により線路雑音はひずみの等価雑音とほぼ電力和の形で相加して影響を与えらるゝとしてよい。

信号入力レベルが -3 dB になると信号の過負荷が生ずる。図 4.1 によればこの場合は曲線は右よりであって、雑音の影響は量子化による効果を増大させることがわかる。過負荷の場合、このような妨害効果の理由を明らかにするため、さらにいろいろな信号入力レベルで実験を行い、その結果を図 4.2 に示した。図 4.2 では横軸に等価雑音レベル（信号入力レベル基準）、縦軸に等価レベル変化をとり、これらの値が過負荷系を通過する前後でどのような変化を受けるかを矢印で表わしてある。図 4.2 により、雑音レベルの変化に比べ等価レベルの変化が大きく、このため S/N 比が減少していることがわかる。S/N 比の劣化量は、信号入力レベルが 10 dB 以内ならば、5 dB ないし 8 dB である。

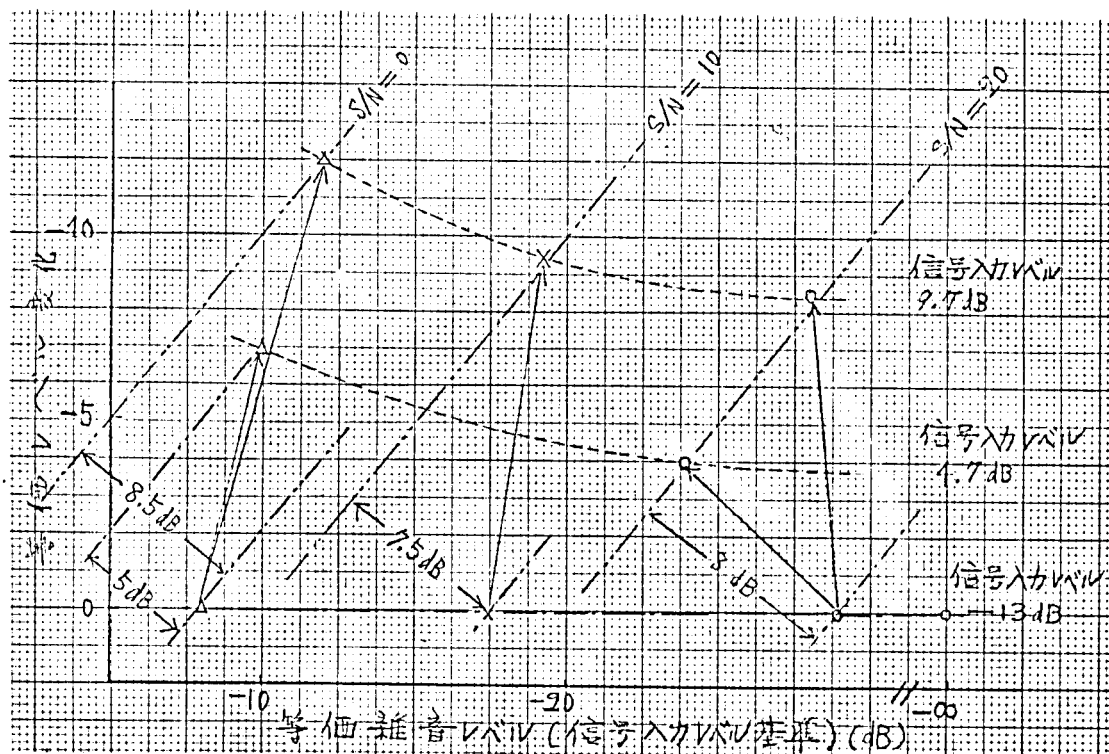


図4.2 線路雑音の影響（過負荷の場合）

結局以上の実験を通じ、商用電話系において加わる程度の線路雑音ならば、その影響は必ずみの等価雑音と線路雑音との電力和としてよいが、過負荷の起っている系では、線路雑音は信号レベルの劣化を助長し、 S/N 比を5ないし8 dB程劣化させる効果をもたらすことが明らかとなった。

4.3 符号誤りの影響

PCM系では伝送線路上の線路雑音のために符号誤りが生ずることがある。符号誤りが生ずると、受聴音にはパルス性の雑音が伴うことになり通話品質が劣化する。そこでまず信号入力レベルをいくつか変えて符号誤りの明りょう度試験をおこない、また同時に雑音レベルの測定をおこなった。

図4.3に明りょう度試験結果および符号誤りひずみ電力の測定結果を示す。横軸には誤符号回数、縦軸には信号対明りょう度等価雑音ならびに信号対誤符号ひずみ比とってある。この図から、誤符号回数に対する等価雑音ならびにひずみ電力の関係が、いずれも、 4dB/oct の傾斜であらわされることが導かれる。この図から、信号入力レベルが -13dB の場合、誤符号による信号対等価雑音比が量子化による信号対等価雑音比(28dB)と等しくなるのは誤符号回数が 15回/秒 の時、すなわち、誤符号

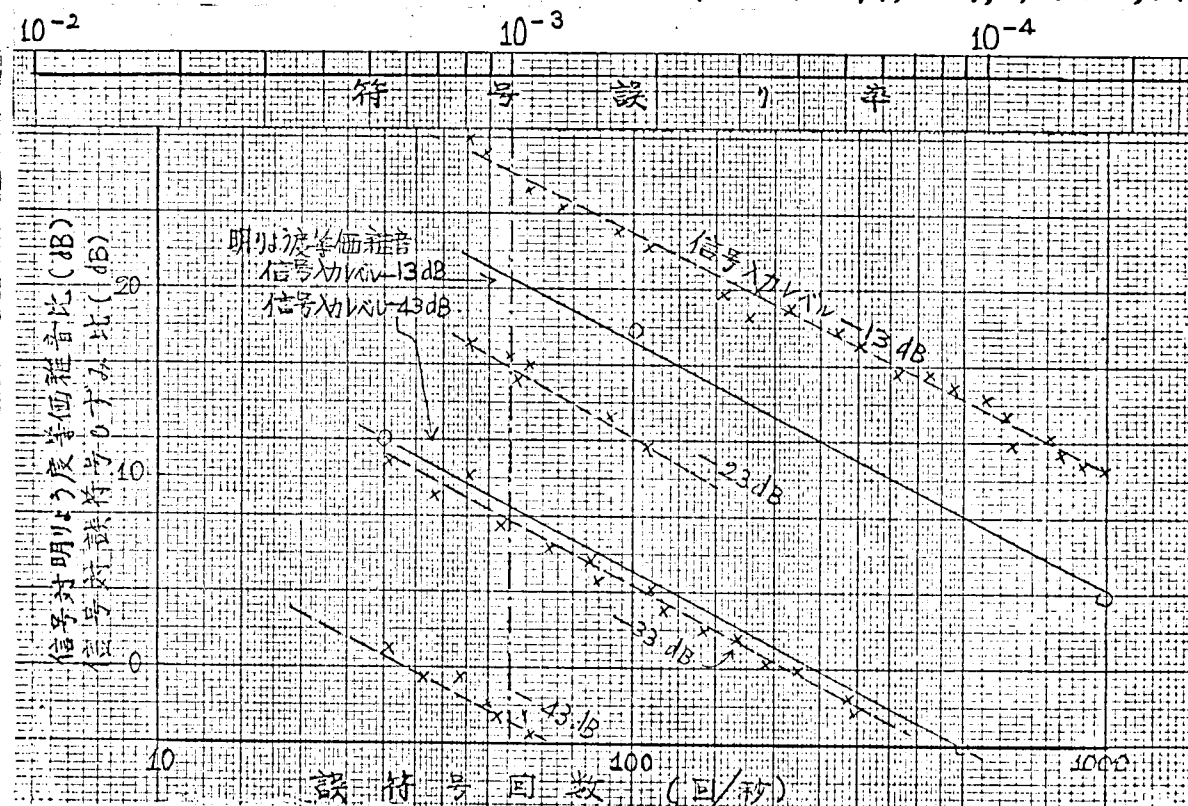


図4.3 誤符号回数に対する信号対明りょう度等価雑音比ならびに信号対誤符号ひずみ比

率がほぼ 2.7×10^{-4} の時であることがわかる。符号誤り率に関する現行の規格は、線路雑音の S/N 比 23 dB において、符号誤り率 10^{-6} 以下となっている。上記のデータから、外挿計算によって、この符号誤り率に対する信号対等価雑音比を推定すると 48 dB 以上となる。従って 10^{-6} の符号誤り率においては、符号誤りの通話明りょう度への影響は無視してよいといえる。

次に図 4.3 において、同一誤り率時の雑音レベルと等価雑音レベルを比較すると、信号入力レベルによってその値に著るしい傾向の差がみられる。入力レベルの違いが符号誤りにおよぼす影響を、たとえば、誤り率 10^{-3} の場合を例にとり調べてみよう。図 4.3 において、信号対符号誤り雑音比と、信号対等価雑音比を比較すると、信号入力レベルが -13 dB のとき前者は後者より 5 dB 高いが、信号入力レベルが -22 dB で両者は等しくなり、信号入力レベルが低下すると両者の関係は逆転し、-43 dB になると前者は後者より約 10 dB 低くなる。パルス性の雑音におけるこのような性質の解明は、将来に残された興味ある問題である。

また、短文章をもちいて符号誤りによる雑音を知覚できる弁別域を測定した結果、弁別域はほぼ 1 秒あたり 2 回という結果が得られた。これを符号誤り率におおすと 3×10^{-5} となる。従って現行の規格である 10^{-6} の誤り率は十分にこれを下廻っており、明りょう度で得られた結果とあわせ考えるならば、現行の規格を満たす PCM 系では符号誤りの影響は無視してよいと言える。

4.4 マリンク接続の影響⁽⁵⁾

我国における国内商用電話系の回線網の構成から見て、PCM系の接続に関し、最大4リンクまでが考えられる。本節ではリンク接続数が通話品質におよぼす影響について検討を加える。

実験には、商用の24通話路端局装置を用いた。ここで用いた回線構成では、リンク接続の影響だけを明らかにするため、リンクにおけるレベルの減衰を考慮に入れなかった。図4.4に、正弦波によるいずみのSN比(実測値)、いずみの電力和(計算値)および明りょう度等価雑音のSN比を示す。ここでいずみの電力和は1リンクの値を基準にした計算値であって、レベルの変化によるいずみの変化分を考慮してある。図4.4の結果から、マリンク接続に関して次のような単純な結論が導かれる。すなわち、マリンク接続の明りょう度等価雑音はいずみ電力より約3dBレベルが高く、またリンク接続数に対しては電力和で増大する。ただしこの結論は過負荷が生じないことを前提としており、もし過負荷が生ずればこの関係は成り立たない。

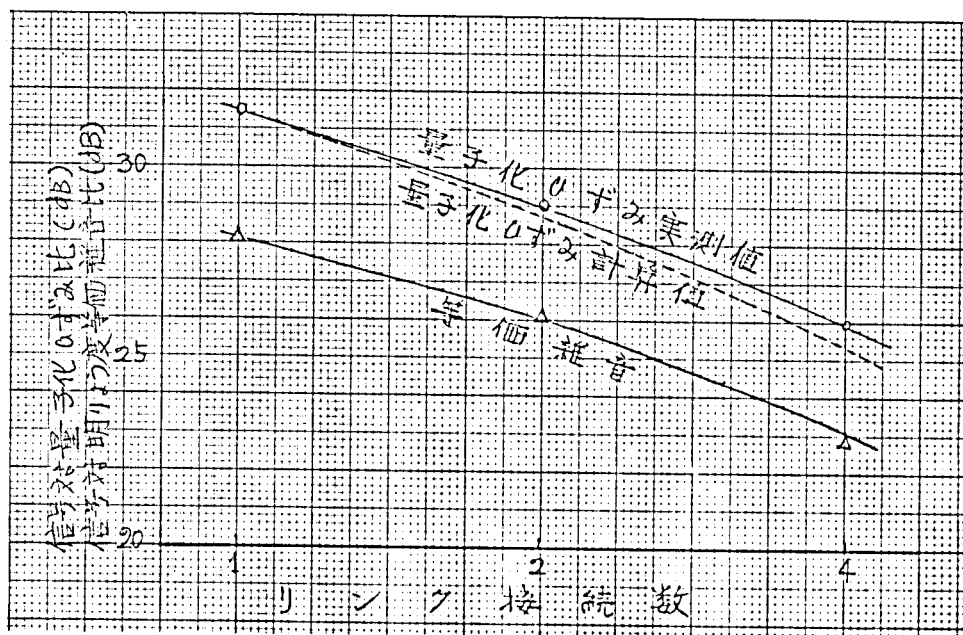


図 4.4 マリンク接続の影響

4.5 結論

本章においては、商用電話系との関連で考慮されるべき線路雑音、符号誤り、多リンク接続について明瞭な度等価雑音を誘導して通話品質におよぼす影響をしらべた。その結果、①入力線路雑音による影響は、等価雑音と入力線路雑音の間で入力線路雑音の S/N 比 約 20 dB 以上のとき電力和の法則が成立するとみなし得るが、それより S/N 比の低い雑音の場合は、量子化ひずみの影響を減ずるような効果のあること、②過負荷ひずみと入力線路雑音との間の関係は、等価雑音の電力和と見なすことは出来ず、雑音レベルの増大が信号レベルを低下せしめるなどの相乗効果が生じていること、③符号回線の雑音によって生ずる符号誤りの影響は、符号誤り率が 10^{-6} では無視し得るが、たとえば符号誤り率 10^{-3} など誤り率の高いものでは品質に影響をおよぼし、この影響はひずみ電力と単純な関係にないこと、④多リンク接続による影響は単一リンクの電力和とみなしてよいこと、などがそれぞれ明らかとなった。

本章において明らかにされたのは主として上の 4 点であるが、これらと波形ひずみの観点から見ると、①量子化ひずみと線路雑音あるいは量子化ひずみと他の量子化ひずみが重畳した場合の等価雑音はそれぞれの等価雑音の和とみなしてよいが、過負荷ひずみと雑音の重畳したひずみの場合にはこの関係が成り立たないこと、②パルス性の誤符号ひずみの場合には、ひずみ電力と等価雑音との間に簡単な関係にないことの 2 点にまとめられる。これらのひずみの影響を解析するためには、波形のスペクトルや時間構造などが聴覚の基本特性に及ぼす影響をも考慮する必要があると考えられる。これらは将来に残された興味ある問題である。

第5章 PCM系の波形ひずみスペクトルを考慮した 明りょう度予測⁽¹⁾

5.1 概論

これまで、第3, 4章において、PCM通信方式における波形ひずみが明りょう度におよぼす影響を、主として直通系の等価雑音レベルと等価レベル変化の二つの要素をもちいて表現し、これらが波形ひずみ電力の計算値とどのような関係にあるかをしらべて来た。その結果、両者の関係は波形ひずみの種類により大きく異なり、量子化ひずみでは等価雑音レベルが若干大きく、過負荷ひずみでは等価レベル変化量は計算値と一致するが、等価雑音レベルは計算値よりかなり低いことがわかった。

このような結果については、両者の電カスペクトル、あるいはスペクトルの帯域内相関性、あるいは信号との相関、その他種々の要因が考えられるが、ここではこのような要因のうち電カスペクトルにもとづく検討を試みた。

量子化ひずみのスペクトルは、これまで W.B. Bennett や A.I. Velichkin らにより求められている。Bennett は 音声 が帯域内で平坦なスペクトルをもち、且つその瞬時振幅がガウス分布であると仮定して、ひずみの電カスペクトルを導いた。⁽²⁾ また Velichkin は音声スペクトルを平坦とみなさず、一組の共役極を持つ近似式であてはめ、ひずみのスペクトルを導いている。⁽³⁾⁽⁴⁾

Velichkin の方法は 日本語 単音節 の場合にもあてはめることができ、また適用範囲を拡張することによって過負荷ひずみのスペクトルをも求めることが可能である。このようにして、ビット数、入力レベル、圧伸率のいろいろな組合せによって波形ひずみスペクトルの計算を行ない、得られたスペクトル計算結果から、

品質実験との対応を調べることもできる。

このような計算と検討を行った結果、PCM系における波形ゆずみの品質劣化は、スペクトルによる差異を考慮しても、なおかつ、線路雑音による品質劣化との間にかなりはっきりした差異があることがわかった。以下まず5.2節および5.3節で量子化による波形ゆずみの計算方法と日本語音節への適用、5.4節でスペクトル計算結果とその特徴、5.5節でスペクトル計算結果の明りょう度予測法への適用について述べる。

5.2 量子化音声の電力スペクトルの計算式

本章で用いる波形ひずみスペクトルの計算式では、① 音声レベル分布が2つのガウス分布の和として表わされることと、② 音声の長時間スペクトルが

$$S(\omega) = \frac{\rho\sigma^2}{\pi} \left[\frac{1}{\rho^2 + (\omega_0 - \omega)^2} + \frac{1}{\rho^2 + (\omega_0 + \omega)^2} \right] \quad (5.1)$$

で近似されることの2つの前提が必要とされている。第3章 図3.6 に示したのは、明りょう度試験用音節表による日本語音声レベル分布であり、本章 図5.1 に示したのはそのスペクトル密度であって、上の二つの前提が、必ずしも精度の高い近似ではないにしても、第一近似としては十分成り立ち得るものであることがわかる。この音声信号に、量子化特性

$$y = q(x) = y_1 + \sum_{k=1}^N \int_{-\infty}^x \Delta_k \cdot \delta(\xi - x_k) d\xi \quad (5.2)$$

なる量子化を施すと、音声信号スペクトル $S_y(\omega)$ は式(5.15)に与えられるものとなる。以下、式(5.15)の導出について説明を加える。

一般に電力スペクトルは、よく知られた確率過程の定理により自己相関関数の余弦積分変換に等しい。したがって電力スペクトルを求めるためには、音声の自己相関関数を知ることが必要である。そこでまず、量子化音声の自己相関関数 $K_y(\tau)$ を求める。

音声の2次元確率密度分布を $w_2(x', x'', \tau)$ 、(ただし $x' - x'' \equiv \tau$)、量子化特性を $y = q(x)$ とすると、量子化音声の自己相関関数は

$$K_y(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x') q(x'') \cdot w_2(x', x'', \tau) dx' dx'' \quad (5.3)$$

で表わされる。 $q(x')$, $q(x'')$ は式(5.2)に与えられているから $w_2(x', x'', \tau)$ について考えてみよう。音声の2次元確率密度分布は音声の1次元確率密度分布と密接な関連があり、前者は後に述べる式(5.6)によって後者から導かれる。音声の

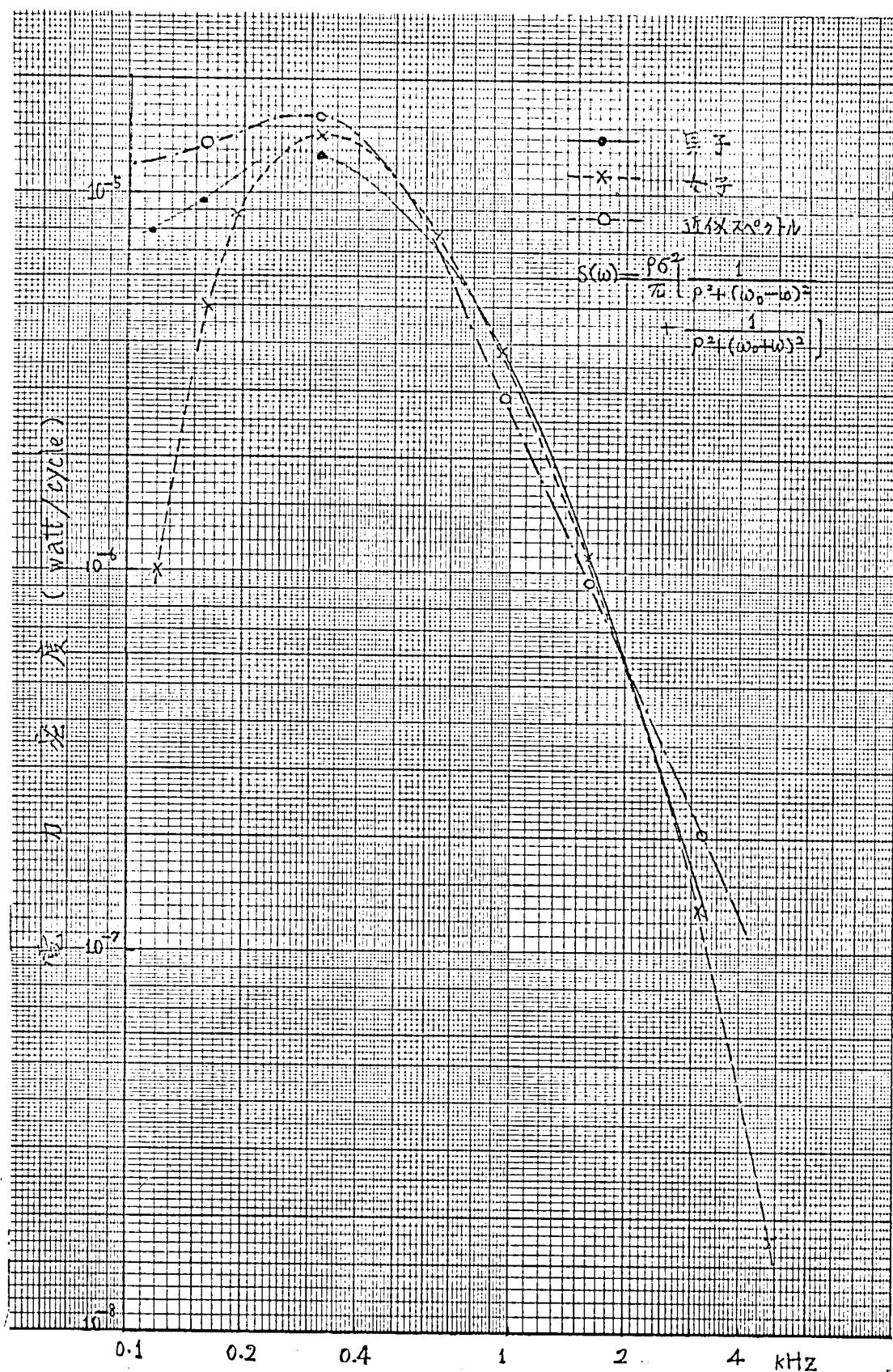


図5.1 明りょう度試験用日本語音声スペクトル

1次元確率密度分布は本節の最初に述べた2つの前提のうちのはじめの前提①により2つのガウス分布の和として表わされることを仮定しているから、

$$w_1(x) = p_v \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_v}\right)^2} + p_c \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_c}\right)^2} \quad (5.4)$$

となる*。音声の継続時間はその相関時間より十分長いから、2次元密度分布関数

$$w_2(x', x'', \tau) = p_v w_{2v}(x', x'', \tau) + p_c w_{2c}(x', x'', \tau) \quad (5.5)$$

と考えるとよい。さらにこの右辺の各項は定義により1次元の密度分布のパラメータを

$$\begin{aligned} \text{用いて } w_2(x', x'', \tau) = & p_v \frac{1}{2\pi\sigma_v\sqrt{1-R_v^2(\tau)}} \cdot \exp\left[-\frac{x'^2 R_v(\tau)x'x'' + x''^2}{2\sigma_v^2(1-R_v^2(\tau))}\right] \\ & + p_c \frac{1}{2\pi\sigma_c\sqrt{1-R_c^2(\tau)}} \cdot \exp\left[-\frac{x'^2 R_c(\tau)x'x'' + x''^2}{2\sigma_c^2(1-R_c^2(\tau))}\right] \end{aligned} \quad (5.6)$$

となる。ただし $R_v(\tau)$, $R_c(\tau)$ はそれぞれ母音部ならびに子音部の相関係数である。

式(5.6)の各項は、添字 c, v を取りまわって、共通に考えると、

$$\begin{aligned} w_2(x', x'', \tau) = & \frac{1}{2\pi\sigma^2\sqrt{1-R^2(\tau)}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2(1-R^2(\tau))}\left\{R^2(\tau)\left(\frac{x'}{\sigma}\right)^2 - 2R(\tau)\left(\frac{x'}{\sigma}\right)\left(\frac{x''}{\sigma}\right) + R^2(\tau)\left(\frac{x''}{\sigma}\right)^2\right\}\right] \\ & \cdot \exp\left(-\frac{x'^2}{2\sigma^2} - \frac{x''^2}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (5.7)$$

となるが、Cramér の展開式

$$\frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \exp\left\{\frac{t^2x^2+t^2y^2-2txy}{2(1-t^2)}\right\} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(x) \cdot H_n(y)}{n!} \cdot t^n \quad |t| < 1$$

を適用すれば、

$$w_2(x', x'', \tau) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} H_n\left(\frac{x'}{\sigma}\right) \cdot H_n\left(\frac{x''}{\sigma}\right) \cdot \frac{R^n(\tau)}{n!} \right] \cdot \exp\left(-\frac{x'^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{x''^2}{2\sigma^2}\right)$$

となる。確率積分 $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \equiv \Phi(x)$ の $n+1$ 階の微分は Hermite 関数 $H_n(x)$

$$\text{と、} \quad \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x}{\sigma}\right) = (-1)^n \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot H_n\left(\frac{x}{\sigma}\right) \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5.8)$$

の関係にあるから、これを用いて式(5.7)を書直せば

$$w_2(x', x'', \tau) = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{\infty} \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) \cdot \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x''}{\sigma}\right) \cdot \frac{R^n(\tau)}{n!} \quad (5.9)$$

となる。したがってここで式(5.6)にかえて添字 c, v をもとして各項を書くと

註*) 添字 v, c はそれぞれ音声の母音部、子音部に対応する⁽³⁾。

$$w_2(x', x'', \tau) = p_v \cdot \frac{1}{\sigma_v^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma_v}\right) \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x''}{\sigma_v}\right) \cdot \frac{R_v^n(\tau)}{n!} \\ + p_c \cdot \frac{1}{\sigma_c^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma_c}\right) \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x''}{\sigma_c}\right) \cdot \frac{R_c^n(\tau)}{n!} \quad (5.10)$$

となる。

一方 $K_y(\tau)$ についても，音声の継続時間がその相関時間よりも十分長いという

$$\text{理由で } K_y(\tau) = p_v k_{yv}(\tau) + p_c k_{yc}(\tau) \quad (5.11)$$

$$\text{となり， } K_{yv}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x') \cdot q(x'') \cdot w_{2v}(x', x'', \tau) dx' dx'' \quad (5.12)$$

$$K_{yc}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x') \cdot q(x'') \cdot w_{2c}(x', x'', \tau) dx' dx'' \quad (5.12)'$$

となる。式(5.12)の $q(x')$, $q(x'')$ に式(5.2)をもちい， $w_{2v}(x', x'', \tau)$ に式(5.9)

に添字 v を付したものをもちいて計算すると

$$K_{yv}(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R_v^n(\tau)}{n!} \left[\frac{1}{\sigma_v} \int_{-\infty}^{\infty} q(x') \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma_v}\right) dx' \right] \cdot \left[\frac{1}{\sigma_v} \int_{-\infty}^{\infty} q(x'') \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x''}{\sigma_v}\right) dx'' \right]$$

一番目の $[\]$ を A とおくと，部分積分法により

$$A = \frac{1}{\sigma_v} \int_{-\infty}^{\infty} q(x') \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma_v}\right) dx' = \frac{1}{\sigma_v} \left[\sigma_v \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma_v}\right) q(x') \right]_{-\infty}^{\infty} - \sigma_v \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{(n)}\left(\frac{x'}{\sigma_v}\right) \left(\frac{dq(x')}{dx'} \right) dx' \\ = - \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{(n)}\left(\frac{x'}{\sigma_v}\right) \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k (x' - x_k) dx' \\ = - \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta_k \delta(x' - x_k) \Phi^{(n)}\left(\frac{x'}{\sigma_v}\right) dx' = - \sum_{k=1}^{\infty} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_v}\right)$$

二番目の $[\]$ を B とおくと，上と同様に

$$B = - \sum_{k=1}^{\infty} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_v}\right)$$

となるから，結局 $K_{yv}(\tau)$ は

$$K_{yv}(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_v^n(\tau)}{n!} \left[\sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_v}\right) \right]^2$$

となる。 $K_{yc}(\tau)$ も同様にして求める。一方，音声波形についてはその相関係数について，ほい

$$R(\tau) = R_v(\tau) = R_c(\tau)$$

； $R(\tau)$ は音声全体についての相関係数

が成り立つものと仮定すれば，⁽⁵⁾ 結局量子化音声の相関関数は次式のようになる。

$$K_y(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R^n(\tau)}{n!} \left[p_v \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_v}\right) \right\}^2 + p_c \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_c}\right) \right\}^2 \right]$$

これは，出力音声波形の平均電力 $\sigma_y^2 = \sum_{k=1}^N y_k^2 \cdot p_k$ で規格化した次式の形となる。

$$K_y(\tau) = \sigma_y^2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot R^n(\tau) \quad (5.13)$$

$$\text{ただし, } a_n = \frac{1}{\sigma_y^2 \cdot n!} \left[p_v \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_v}\right) \right\}^2 + p_c \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_c}\right) \right\}^2 \right] \quad (5.13)'$$

つぎに，音声の相関係数 $R(\tau)$ を求める必要がある。音声スペクトルは，式(5.1)で与えられているが，相関関数 $K(\tau)$ が Wiener- khintchine の定理によって音声スペクトルと次式

$$K(\tau) = \int_0^{\infty} S(\omega) \cdot \cos \tau \omega \cdot d\omega$$

で結ばれ，また音声の相関係数 $R(\tau)$ は定義により

$$R(\tau) = \frac{K(\tau)}{\sigma^2}$$

で与えられることを考慮すれば，結局

$$R(\tau) = \frac{K(\tau)}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\infty} S(\omega) \cos \tau \omega d\omega = e^{-\rho|\tau|} \cos \omega_0 \tau \quad (5.14)$$

となる。したがって式(5.13)により

$$K_y(\tau) = \sigma_y^2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n (e^{-\rho|\tau|} \cdot \cos \omega_0 \tau)^n$$

となる。求める電力スペクトル $S_y(\omega)$ は $K_y(\tau)$ の余弦積変換で次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} S_y(\omega) &= 4 \int_0^{\infty} K_y(\tau) \cos \omega \tau d\tau \\ &= 4\sigma_y^2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\rho n|\tau|} \{\cos(\omega_0 \tau)\}^n \cos \omega \tau d\tau \right\} \end{aligned}$$

$$\text{ここで } \{\cos(\omega_0 \tau)\}^n = \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n n C_k \cdot e^{j(n-2k)\omega_0 \tau}$$

$$\cos(\omega \tau) = \frac{1}{2} (e^{j\omega \tau} + e^{-j\omega \tau})$$

なることをもちいると，

$$\begin{aligned}
 S_y(\omega) &= \sigma_y^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \frac{1}{2^{n-2}} \sum_{k=0}^n n C_k \left[\frac{1}{2} \int_0^{\infty} e^{j(n-2k)\omega_0\tau} (e^{j\omega\tau} + e^{-j\omega\tau}) e^{n p \tau} d\tau \right] \\
 &= \sigma_y^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \frac{1}{2^{n-2}} \sum_{k=0}^n n C_k \left[\frac{(1/2)}{n p - j\{(n-2k)\omega_0 - \omega\}} + \frac{(1/2)}{n p - j\{(n-2k)\omega_0 + \omega\}} \right]
 \end{aligned}$$

こゝでは正負対称な量子化のみを扱っているので、式(5.13)'で与えられた a_n の性質より n が偶数の場合は $a_n=0$ となり、奇数の場合だけが残る。また $n C_r = n C_{n-r}$ であることに注意すると、結局 k は0から $\frac{n-1}{2}$ までの整数値をとりうることになる。したがって最終的に次式を得る。

$$S_y(\omega) = \sigma_y^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{n p}{2^{n-2}} \cdot \sum_{k=0}^{n-1/2} n C_k \left\{ \frac{1}{(n p)^2 + \{(n-2k)\omega_0 + \omega\}^2} + \frac{1}{(n p)^2 + \{(n-2k)\omega_0 - \omega\}^2} \right\}$$

結局以上の結果をまとめると、量子化された音声のスペクトル $S_y(\omega)$ は

$$S_y(\omega) = \sigma_y^2 \sum a_n A_n(\omega) \quad (5.15)$$

$$a_n = \frac{1}{\sigma_y \cdot n!} \left[p_v \left\{ \sum_{k=1}^{N-1/2} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_v}\right) \right\}^2 + p_c \left\{ \sum_{k=1}^{N-1/2} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_c}\right) \right\}^2 \right] \quad (5.15)'$$

$$A_n(\omega) = \frac{n p}{2^{n-2}} \cdot \sum_{k=0}^{n-1/2} n C_k \left[\frac{1}{(n p)^2 + \{(n-2k)\omega_0 + \omega\}^2} + \frac{1}{(n p)^2 + \{(n-2k)\omega_0 - \omega\}^2} \right] \quad (5.15)''$$

で与えられることがわかる。

つぎに、式(5.15)で与えられた量子化音声のスペクトルが、量子化ゆずみそのもののスペクトルとどのような関係にあるかを明らかにする必要がある。量子化ゆずみ波形は

$$y = g(x) - x \quad (5.16)$$

で与えられるから、この相関関数は次式から計算される。

$$\begin{aligned}
 K_g(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{g(x') - x'\} \{g(x'') - x''\} w_2(x', x'', \tau) dx' dx'' \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R(\tau)^n}{n!} \left[\frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \{g(x') - x\} \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) dx' \right] \left[\frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \{g(x'') - x\} \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x''}{\sigma}\right) dx'' \right]
 \end{aligned}$$

前と同様に最初の[]を A とおけば

$$A = \frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} g(x') \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) dx' - \frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} x' \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) dx'$$

第1項は $K_g(\tau)$ の場合と全く同じであり、第2項目はこれを C とおくと

$$C = \frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} x' \Phi^{(n+1)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) dx' = \frac{1}{\sigma} \left[\sigma \left| x' \Phi^{(n)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) \right|_{-\infty}^{\infty} - \sigma \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{(n)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) dx' \right] \\ = - \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{(n)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) dx'$$

となる。

$$n=1 \text{ では } C = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x'}{\sigma}\right)^2} dx' = -\sigma \quad \text{であるから } A = -\sigma - \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(1)}\left(\frac{x_k}{\sigma}\right)$$

$$n \geq 3 \text{ では } C = -\sigma \left| \Phi^{(n-1)}\left(\frac{x'}{\sigma}\right) \right|_{-\infty}^{\infty} = 0 \quad \text{であるから } A = - \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma}\right)$$

Bについても全く同一の式をうる。よって a_n' は次式で与えられる。

$$n=1; \quad a_1' = \frac{p_v}{\sigma_y^2} \left[\sigma_v - \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(1)}\left(\frac{x_k}{\sigma_v}\right) \right]^2 + \frac{p_c}{\sigma_y^2} \left[\sigma_c - \sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(1)}\left(\frac{x_k}{\sigma_c}\right) \right]^2 \quad (5.17)$$

$$n \geq 3; \quad a_n' = \frac{p_v}{\sigma_y^2 n!} \left[\sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_v}\right) \right]^2 + \frac{p_c}{\sigma_y^2 n!} \left[\sum_{k=1}^{N-1} \Delta_k \Phi^{(n)}\left(\frac{x_k}{\sigma_c}\right) \right]^2 \quad (5.18)$$

したがって 量子化ひずみの相関関数はこの a_n' をもちいることにより

$$K_q(\tau) = \sigma_y^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n' R(\tau)^n \quad (5.19)$$

となる。 $K_f(\tau)$ と $K_y(\tau)$ とは a_n を除いては同じ形をしており、結局式(5.15)と式(5.15)''については同じ結果になることがわかる。式(5.15)'の a_n と 式(5.17)および(5.18)の a_n' に関しては、 $n \geq 3$ のとき

$$a_n = a_n' \quad (5.20)$$

であり、 a_1, a_1' は式(5.1)で与えられる 入力音声スペクトルの係数であるから、結局 $a_n, A_n(\omega)$ は $n \geq 3$ のとき量子化ひずみのスペクトルをあらわすことがわかる。このとき a_1' は量子化ひずみの中に含まれる原音声成分に相当し、過負荷ひずみなど導いたレベル変化に対応する変動成分である。

したがって 音声の量子化によって生ずる波形ひずみのスペクトルは、式(5.15)''で与えられる基底となる展開スペクトル $A_n(\omega)$ に 重み係数 a_n を乗じて、 $n \geq 3$ なるすべての n について加え合わせれば計算できることがわかる。係数 a_n は 式(5.15)'に見られるように、量子化幅 Δ_k ($k=1, 2, \dots, N$) と 音声実効値 σ_v, σ_c 、およびそれぞれの出現確率 p_v, p_c から定まり、対称量子化では奇数番目の a_n のみを用

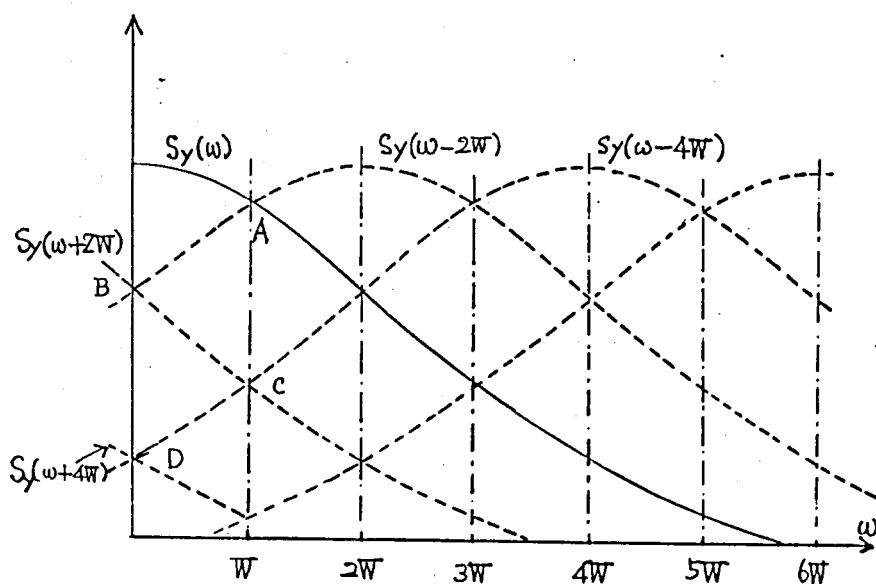
いられる。 $A_n(\omega)$ は $S_y(\omega)$ の基底となるスペクトルで、音声波形の長時間平均スペクトルのパラメータ P , ω_0 のみによって定まる。

ところで、PCM系では信号の標本化が行われるが、このため式(5.15), (5.15)'は次のような形に書直されることになる。すなわち標本化周期を T として

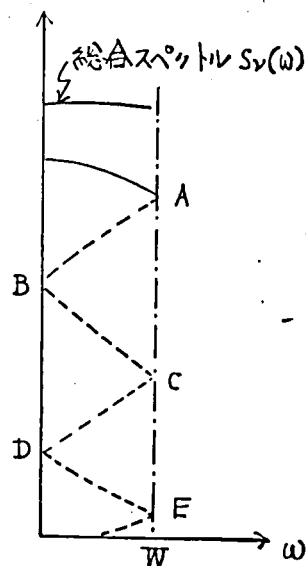
$$S_y(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n A_n'(\omega) \quad (5.21)$$

$$A_n'(\omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ A_n\left(\omega + \frac{2m\pi}{T}\right) + A_n\left(\omega - \frac{2m\pi}{T}\right) \right\} \quad (5.21)'$$

となり、これは、 $A_n(\omega)$ の成分を $m\pi/T$ ごとに折り返したものに等しい。したがって計算の手順としては、まずそれぞれの n について $A_n(\omega)$ を求め、さらにこれを標本化周波数の $m/2$ の英で交互に折り返し加えることによって $A_n'(\omega)$ を求め、次に各量子化条件から a_n を計算し、 $\sum a_n A_n'(\omega)$ が収束するまで n を増加して計算を続ければよいことになる。この計算方法は B_T , B_C が大きく、音声の飽和が生ずる場合にも拡張可能であって、このような場合への拡張適用により、量子化上限における飽和にもとづく過負荷ひずみのスペクトルを計算することが可能となる。



(a) 標本化前のスペクトル $S_y(\omega)$ と $S_y(\omega \pm 2mW)$



(b) 折返し成分と総合スペクトル $S_y(\omega)$

図5.2 標本化したときの量子化ひずみスペクトル

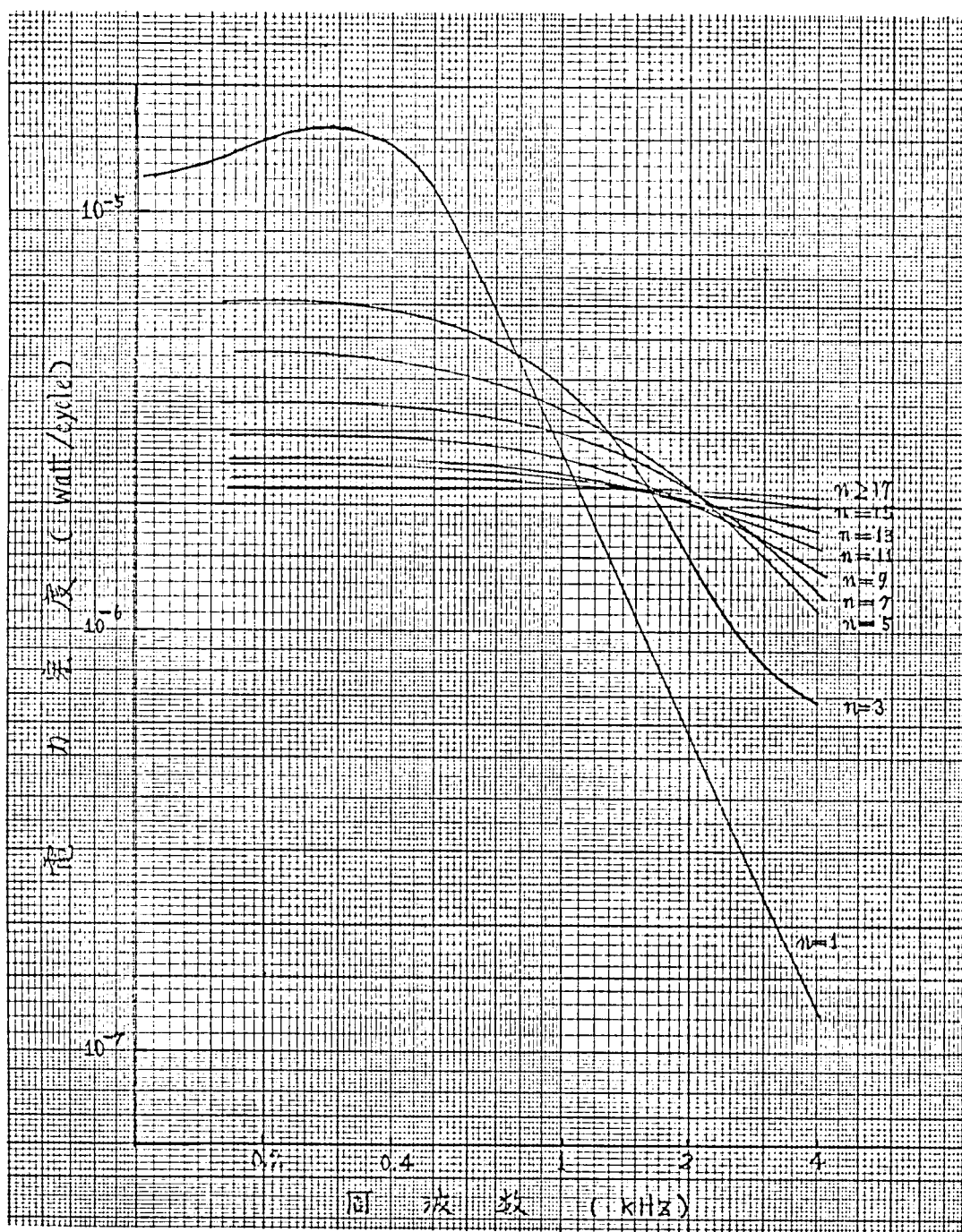


図5.3 標本化したときの基底スペクトル $A'_n(\omega)$

5.3 日本語音声の波形ひずみスペクトルの計算

前節で導入された諸式を明りょう度試験に用いた日本語百音節音声にあてはめ、波形ひずみのスペクトルを求めてみよう。このためには音声に関する種々のパラメータを測定しなければならない。出現確率 p_v, p_c および実効値 σ_v, σ_c は、明りょう度試験用の日本語音節から下式のように求まった。

$$\left. \begin{aligned} p_v &= \sum_{i=1}^{200} t_{vi} / \sum_{i=1}^{200} (t_{vi} + t_{ci}) = 0.815 & p_c &= \sum_{i=1}^{200} t_{ci} / \sum_{i=1}^{200} (t_{vi} + t_{ci}) = 0.185 \\ \sigma_v &= \sum_{i=1}^{200} a_{vi}^2 \cdot t_{vi} / \sum_{i=1}^{200} t_{vi} = 1.1036 & \sigma_c &= \sum_{i=1}^{200} a_{ci}^2 t_{ci} / \sum_{i=1}^{200} t_{ci} = 0.2076 \end{aligned} \right\} (5.22)$$

ただし t_{vi}, t_{ci} は、 i 番目の単音節における母音および子音の継続時間、 a_{vi}, a_{ci} はそれらの実効振幅値である。また、上式の σ は音声の実効値であって、

$$\sigma^2 = p_v \sigma_v^2 + p_c \sigma_c^2 \quad (5.23)$$

の関係がある。従って入力音声レベルが定まれば σ_v, σ_c の値が式(5.22)および(5.23)から定まることがわかる。次に音声の長時間平均スペクトルから推定したパラメータ ρ および ω_0 の値は、すでに図5.1に示したように

$$\rho = 1600 \text{ rad/sec}, \quad \omega_0 = 2000 \text{ rad/sec}$$

であった。以上により計算の準備が整ったが、計算を実行すべき量子化条件は、すでに第3章、第4章などでおこなったPCM通話品質の実験条件のうちの代表的な条件を選んだ。すなわちビット数 7, 5, 3, 入力信号レベル -3, -13, -43 dB (ただし 0 dB は PCM 系の飽和正弦波レベル), 対数圧伸率 $\mu = 0, 50, 100, 150$, 標本化周波数 8 kHz である。前節に説明した式(5.21), (5.21)' および図5.2によって折り返し操作を行った $A'_n(\omega)$ の $n = 1, 3, 5, \dots$ の曲線を図5.3に示す。こゝでスペクトル密度の単位は、入力信号レベルの単位と同一の単位で目盛っている。 a_n の計算はすべて電子計算機によっておこなった。計算結果は次節で示す。

5.4 日本語音声の波形いずみスペクトルの特徴

前節の計算結果を図5.4, 5.5に示す。本節ではこの図にもとづいて、日本語音声の波形いずみスペクトルの特徴を説明する。

5.4.1 信号入力レベル -13 dB の場合

図5.4は7および5ビットの場合、図5.5は3ビットの場合の計算結果である。これらの図のうち信号入力レベル -13 dB の条件は、音声のピーク・ファクタを考慮して、出力信号に飽和が生じないような最大入力レベルの場合の条件である。図5.4から、7および5ビットでは、ほとんど完全に平坦であることがわかる。また図5.5から、3ビットでは低い周波数成分が幾分大きく、やや右下りの傾向にあることがわかる。この傾向は μ が大きくなるにつれて増大しており、その原因については、 μ が大きくなることにより大振幅での振幅量子化幅が大きくなることと関係があるものと考えられるが、詳細な説明は今後に残された問題である。

5.4.2 信号入力レベル -3 dB の場合

信号入力レベル -3 dB の場合においては、量子化上限の飽和によって過負荷いずみが発生し、波形いずみ電力は新しく発生した過負荷いずみと量子化いずみとの和として表わされる。7ビット、5ビットの場合には、過負荷いずみ電力は量子化いずみ電力よりずっと多く、波形いずみ電力スペクトルはそのほとんどが過負荷いずみで占められている。図5.4における7ビット -3 dB 、5ビット -3 dB の両条件の結果から、過負荷いずみの電力スペクトルの形状を調べると、 1 kHz 以上の周波数で、 -2.5 dB/oct の下降傾向を示していることがわかる。

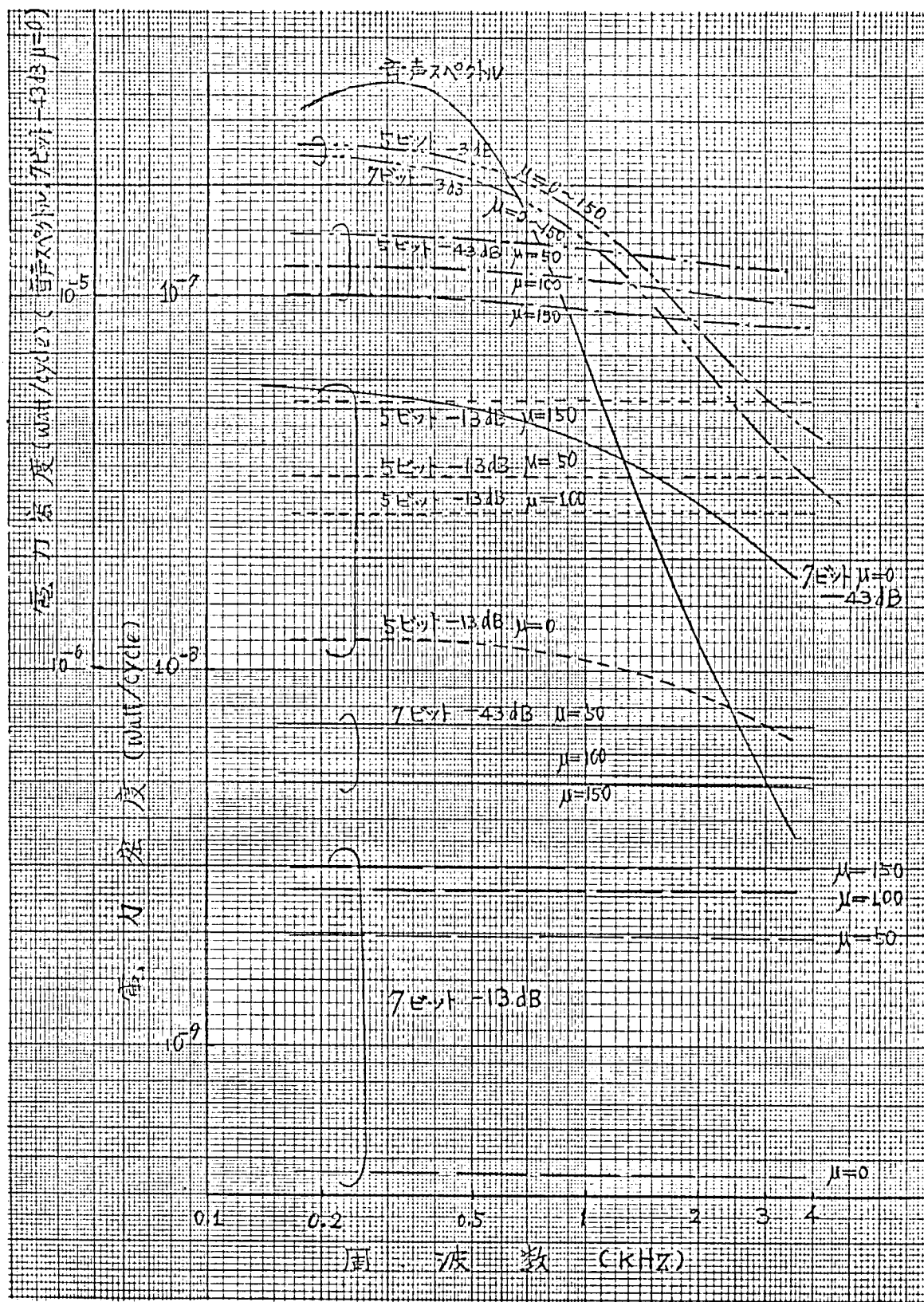


図5.4 波形 μ ずみ 電カスペクトル(7, 5ビット)

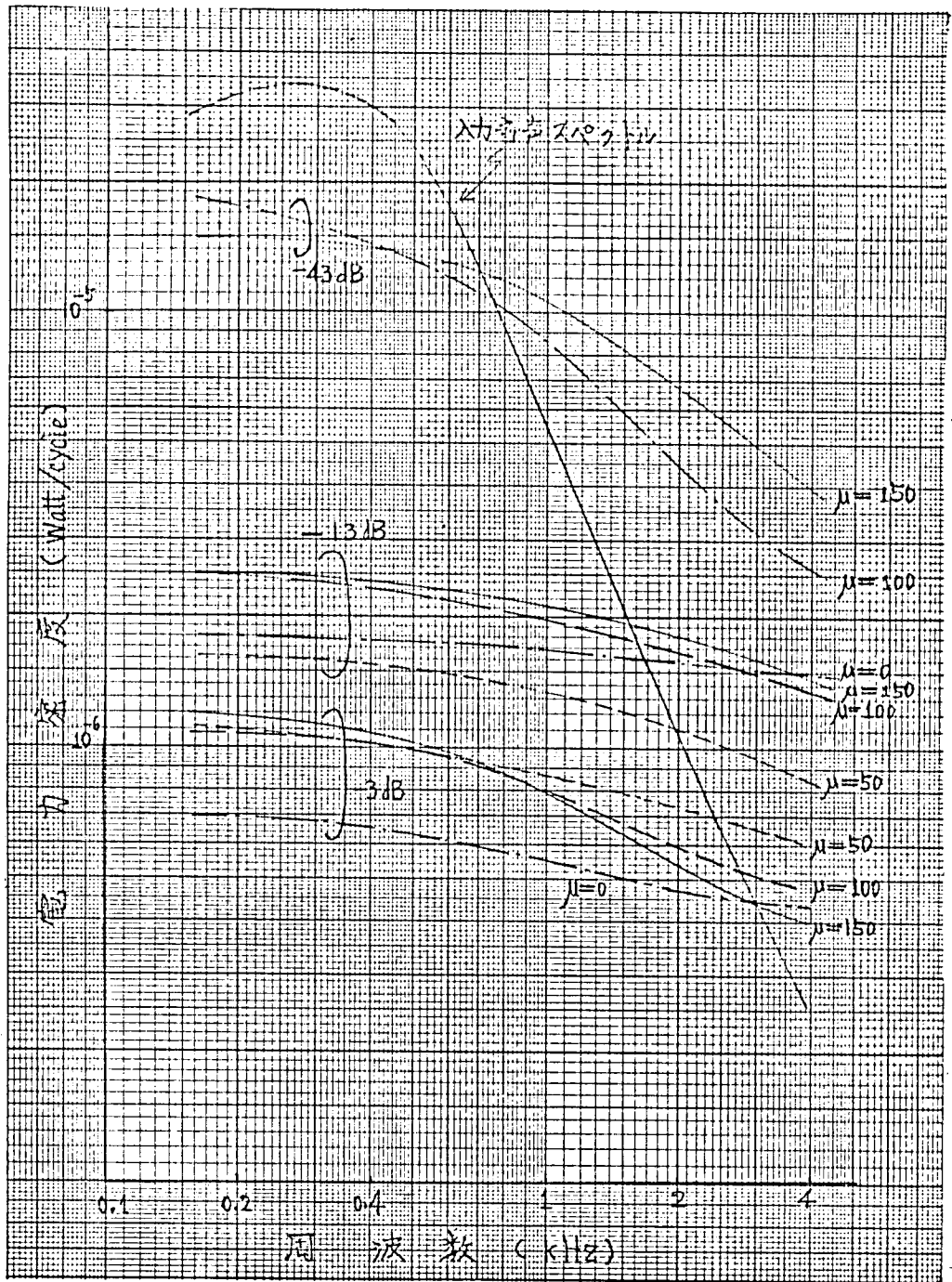


図5.5 波形ミズみ電力スペクトル (3ビット)

3ビットでは、量子化ひずみスペクトルの形状は -13 dB の条件に比較して、わずかに勾配が強くなる程度でほとんど差異が認められないうが、全体のひずみ電力は少くなっている。これは過負荷ひずみの増大より量子化ひずみの減少の方が甚だしいためであると考えられる。

また、過負荷の場合には、出力における音声信号レベルの劣化が生ずるが、この劣化量は式(5.15)'における a_1 の値と入力音声レベルとを比較することにより知られる。信号入力レベル -3 dB の場合、この減衰量は約 0.5 dB であって、この値は第3章 3.7節の図3.10 に示された過負荷ひずみにおける等価レベル変化の値とほぼ一致している。また信号対過負荷ひずみ比は、式(5.15)において $n=1$ の成分と $n \geq 3$ の成分との電力比によって求められる。計算結果によれば、7ビットにおける信号対過負荷ひずみ比は約 12 dB であって、この値は上記の図3.10 に示された結果と一致する。

5.4.3 信号入力レベル -43 dB の場合

この条件では量子化の零レベル近辺に信号が集中するので、音声信号は粗く量子化されることになり、従って対数圧伸率 μ の値によって量子化ひずみ電力値が異なることになる。図5.4 (7および5ビット) の場合、 μ が小さくなるにつれて波形ひずみ電力が大きくなり、 $\mu=0$ で極端に大きくなる。ただし5ビット $\mu=0$ の条件では、信号振幅はすべて最小量子化ステップ内に入るので、出力は現れない。次にスペクトルの形状についてみると、 $\mu=50 \sim 150$ では、ビット

数によりわずかにスペクトルの勾配が異なり、7ビットでは完全に平坦、5ビットではわずかに右下りである。 $\mu=0$ の条件(7ビットのみ)では極端に右下りの勾配を持つ。次に3ビットの場合、 $\mu=50$ 以下では信号は最小量子化ステップ内に入るので出力は現れない。 $\mu=100$ 以上の場合、歪み成分はかなり大きく入力音声信号とほぼ同等の大きさであり、スペクトルの形状も入力音声信号スペクトルに似ている。

		信号入力レベル		
ビット	μ	-3 dB	-13 dB	-43 dB
7	50~150	-2.5 dB/oct	0 dB/oct	0 dB/oct
	0	-2.5 dB/oct	0 dB/oct	-1.5 dB/oct
5	50~150	-2.2 dB/oct	0 dB/oct	-0.6 dB/oct
	0	-2.2 dB/oct	-1.0 dB/oct	—
3	150	-1.3 dB/oct	-0.8 dB/oct	-2.0 dB/oct
	100	-1.0 dB/oct	-0.8 dB/oct	-2.2 dB/oct
	50	-0.8 dB/oct	-0.8 dB/oct	—
	0	-0.7 dB/oct	-0.4 dB/oct	—

表5.1 電カスペクトルの特徴(1~3.5 kHz)

信号レベル ビット	-3 dB	-13 dB	-43 dB
7	0	+	-
5	0	+	-
3	+	+	-

表 5.2 $\frac{Q}{\mu}$ の 正, 負, 零 の 一覧表

以上各条件ごとに説明した波形ひずみスペクトルの形状を, 主として 1~3.5 kHz の周波数範囲における勾配によって表現し, 表 5.1 に記載した。また表 5.2 に, 波形ひずみ電力 Q の, 圧伸率 μ による変化, すなわち $\frac{Q}{\mu}$ の 正・負・零 の別を +, -, 0 の記号で表現し記載した。

5.5 波形ひずみスペクトルの等価雑音とその予測

オ3章 およびオ4章では，波形ひずみの明りょう度等価雑音レベルを明りょう度試験結果より誘導し，この等価雑音レベルをもちいて波形ひずみが通話品質におよぼす影響をしらべて来た。その際，ひずみのない直通系を別に用意し，これに定常ガウス雑音を混入して，波形ひずみと同一の品質劣化をもたらす定常ガウス雑音の電力をもって波形ひずみの等価雑音と定数している。このような実験結果から導かれた等価雑音電力と波形ひずみ電力との間には，ほぼ一義的な関係が成り立っている。すなわち量子化ひずみのみの場合は等価雑音電力は波形ひずみ電力より常に約3dB多く，過負荷ひずみの場合は逆に約十数dB少い。この結果と波形ひずみのスペクトルとの関連を明らかにするため，前節述に得られた波形ひずみを，これと同一のスペクトルをもつ定常ガウス雑音におきかえし，これに明りょう度計算法を適用し，得られた明りょう度特性より明りょう度等価雑音の算出を試みた。

実験で求めた信号対明りょう度等価雑音比を R_N (dB)，上記の理論より求めた信号対明りょう度等価雑音比の計算値を R_D (dB) とし，ビット数，対数圧伸平，信号入力レベルを変えた各条件について R_D を横軸に， R_N を縦軸にとって両者の関係を示したが図5.6である。

図5.6の結果によれば， R_D と R_N とは必ずしも一致せず，条件によってその相互関係は異っている。まず，7ビット，5ビットの条件では，過負荷ひずみと量子化ひずみの間ど，信号入力レベルによる顕著な差異が存在する。すなわち過負荷ひずみの場合には， R_N は R_D よりも常に大きく，この差は7ビットでは8dB

に達するが，5ビットでは5dB前後にとどまる．量子化のずれの場合には，逆に R_N は R_D より常に約3dB程度小さい．図5.6には，これらの比較が容易になされるように $R_N = R_D + 8$ ， $R_N = R_D$ ， $R_N = R_D - 3$ の3本の直線が引かれてある．-オ3ビットの条件では，信号入力レベルの差による R_N と R_D との相

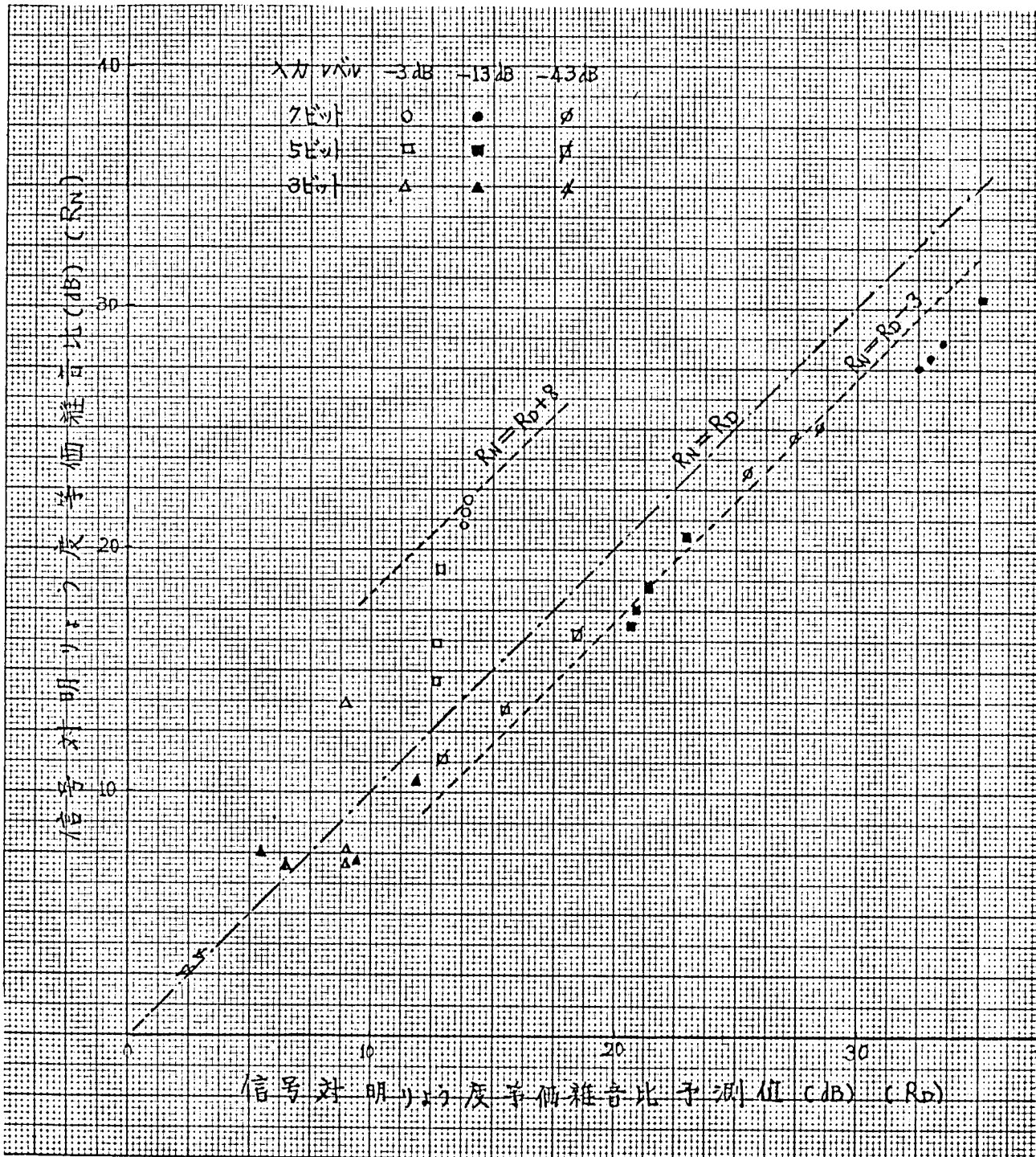


図5.6 信号対明りょう度等価雑音比の予測値と実験値との比較

互関係の差異はあまり顕著でない。これは信号入力レベル -3dB の条件で発生する波形ひずみの中には、量子化ひずみの占める割合が大きく、そのため量子化ひずみのみの場合との差が顕著でないためと考えられる。

いずれにしても図5.6に記載された結果の範囲では、波形ひずみスペクトルを考慮した明りょう度等価雑音レベルの予測値は、実験結果から導かれた明りょう度等価雑音レベル値との間に若干のずれを生じており、このことから波形ひずみの明りょう度計算においては、波形ひずみスペクトルを考慮すべきことは勿論であるが、それ以外に例えば、時間領域におけるひずみの効果を考慮するとか、或いは信号スペクトルと波形ひずみスペクトルの相関係数を考慮に入れるなど、スペクトル以外にこれらの量をあわせて考慮する必要のあることがわかる。

5.6 結論

以上、明りょう度試験結果から導かれた明りょう度等価雑音と、波形のずみ電力計算値との間にかなり大きい差がみられたので、この差を波形のずみスペクトルの観測から説明しようと試み、まず波形のずみスペクトルを各条件ごとに計算した。各実験条件についてのスペクトルの計算結果は5.4節でみたように条件ごとにさまざまな特徴をもっているが、その値はすでに得られた各条件ごとの波形のずみ電力と完全に一致し、また各条件における波形のずみスペクトルの形も測定データと比較して矛盾がない。次にこの波形のずみスペクトルと同一スペクトルをもつ定常ガウス雑音を加わったときの明りょう度特性を明りょう度計算法を適用して求め、この明りょう度特性より明りょう度等価雑音を算出して実験結果との対応をしらべた。このような実験結果との対応関係は、すでに見たように、過負荷のずみ、加わる場合と、量子化のずみのみの場合とではかなり異っており、従ってスペクトルを考慮することによっても過負荷のずみと量子化のずみの両者を総合した高確度の予測は出来なかった。

今後は、波形のずみの時間効果や、信号との相関を考慮した検討が考えられるが、この検討においても波形のずみスペクトルは中心的役割を果たすことが予想される。したがってここで用いられた方法および計算にもちいた日本語音声のパラメータなどが、これらの研究における基本的資料として用いられよう。

第6章 PCM系の音韻異聴による評価

6.1 概論

これまでの各章において、PCM系の波形ひずみが明りょう度によぼす影響を、明りょう度値の劣化が等しい線路雑音におきかえて評価して来たが、本章では、明りょう度についてのすべての情報は異聴現象の中に含まれているとの観点から、PCM系のひずみによる異聴と直通系の線路雑音による異聴の相違を明らかにしようとして、両系の明りょう度試験における異聴特性を整理し、これに信号検出のモデルを適用して、異聴の程度を神聖活動量 d で表現することを試みた。

以下 6.2 節で異聴表の作成法、6.3 節で異聴の大きさを表現するための信号検出モデル、6.4 節で PCM系の波形ひずみによる5母音間の異聴の評価、6.5 節で子音の識別過程の木による表現と PCM系の波形ひずみの木の分岐点での異聴の評価について述べる。

6.2 異聴表の作成

明りょう度試験における異聴現象には音節異聴と音韻異聴とがあるが、こゝでは語音の基本単位が単音であるとする立場から音韻異聴のみを取り上げることにした。明りょう度試験の音節表には100個の音節が含まれ、1音節は2単音から成るので、1送話1枚の音節表には200単音が送話されることになる。明りょう度試験員は4人で構成され、各回の送話において受話は3人で行うので、1送話ごとに600個の単音が送られることになる。1條件は4回の送話から構成されるので、1條件につき計2400個の単音が送られることになり、結局異聴表はこの2400個ごとに1枚づつ構成されることになる。

このような送受話のリストから電子計算機により異聴表を作成するためのプログラム形式には、大別して2種の方法がある。

その1は、人間による異聴表の整理と同様な方法を用いるものであって、人間が送話単音を受話された順序で順々に読出してこれを受聴記録と比較すると同様に、計算機の中に送話音節表をあらかじめ記憶させておき、受聴音節を順々に読出しながら正誤をしらべ異聴表を作成する。したがって、この方法では、計算機の記憶装置の中に予め異聴マトリックスを用意しておく必要があり、単音数が多いときにはこれに要する記憶容量が巨大となる。

その2は予め送話音節表および受聴データをすべて電子計算機に記憶させておき、特定の1単音についてこれが送話音節表のどの位置にあるかをしらべ、これに対応する位置の受聴単音と読みせして異聴をしらべてゆき、1単音についての異聴の集計をおこなう。このような操作をすべて反復するという方法である。

の方法では，前者に比して受聴データも記憶しておく必要があるが，異聴マトリックスの記憶装置は1単音毎に反覆使用できるのでその容量ははるかに少なくてすむという利点がある。しかし試験音節表から特定の単音と探してゆく操作が全部の単音について反覆されるので，計算時間が長くなるという欠点がある。前者をマトリックス計算型，後者をデータ走査型と呼ぶことにする。

ここで異聴表を作成するに用いた計算機は NEAC 2206 電子計算機であって，記憶容量は上記の2方法のいずれをも十分に充たすものであるので，ここでは比較的プログラムの簡単で計算時間の短いマトリックス計算型を採用した。

異聴表は簡単のため母音異聴表と子音異聴表とに分けた。母音は /i/, /e/, /a/, /o/, /u/* の5母音であり，子音は /p/, /t/, /k/, /s/, /z/, /h/, /pj/, /kj/, /tj/, /ʃ/, /hj/, /b/, /d/, /g/, /dz/, /r/, /w/, /j/, /m/, /n/, /bj/, /gj/, /dʒ/, /rj/, /mj/, /nj/, /ɹ/ の27子音である。ただし /ɹ/ は単純母音の前につく空白記号であって透明子音とも呼ばれる。従ってたとえば /ka/ → /a/ の異聴の場合には子音の異聴として /k/ → /ɹ/ が生じているとして扱われる。

なお異聴の計算の際にもちいた PCM 系の実験条件は信号入力レベルが -13 dB，対数圧伸率 μ が 150 および 0，振幅量子化数 γ ，5，3 ビットである。PCM 系の条件と比較すべき直通系の線路雑音条件としては信号対雑音比 -3.5，2.5，11.5 dB および雑音なしの4条件である。

註*) 日本語の「ウ」音は英語などの /u/ 音と異なるため記号 /u/ を用いた。(6)(7)

6.3 信号検出モデルと音韻異聴

異聴表によって PCM系を通過した日本語音韻の異聴特性をしらべるのに、ここでは Tanner によって提案された信号検出のモデル⁽²⁾を用いた。このモデルでは人間の電気生理現象に着目し、人間の知覚を決定するのは、人間における神経活動量であって、神経活動量がある閾値を越えた時に信号の知覚が生じ、そうでない時には知覚が生じないこと、および神経活動量は入力信号によって固有の値をとる変化量 d' と、入力信号にはよらず正規分布をなすランダム変量 H との和であることをまず最初に仮定している。

このような仮定の結果、信号検出の閾値を C としたとき信号を人間が検出する確率は

$$Pr(R) = Pr(d' + H \geq C)$$

となるが、 H は正規分布であって、 $Pr(H < X) = N[X; 0, \text{var}(H)]^*$ である

$$\text{から } Pr(R) = Pr(C - H < d') = N[d'; C, \text{var}(H)]$$

となる。この関係を信号がある生起確率と場合、拡張すると、信号があるときこの存在を知覚する確率は

$$Pr(R|S) = N[d'; C, \text{var}(H)] \quad (6.1)$$

であり、また信号がない時にこれを誤ってあると知覚する確率は

$$Pr(R|\bar{S}) = N[0; C, \text{var}(H)] \quad (6.2)$$

となる。さて Tanner による信号検出モデルでは、信号の存在を知覚する際の人間における判断条件を規定しモデルの成立範囲を明確化するため、次の数個の前提条件が要請される。

註*) $N[X; m, \sigma^2]$ は確率変数 X , 平均値 m , 分散 σ^2 の正規分布関数をあらわすものとする。

すなわち

- ① 人間における信号検出の各試行において信号が存在する場合(S)と存在しない場合(\bar{S})が生起し、 $Pr(S)$ が与えられている。
- ② 各試行において被験者は信号がある(R)あるいは信号がない(\bar{R})のいずれかの応答をする。
- ③ 各試行の結果として $S \rightarrow R$, $\bar{S} \rightarrow R$, $S \rightarrow \bar{R}$, $\bar{S} \rightarrow \bar{R}$ の四つの事象が生起する。
- ④ 各事象にはあらかじめ定められた価値 V_i ($i=1, 2, 3, 4$) が付け加えられている。
- ⑤ V_i については、正答の価値が誤答の価値より高いという条件すなわち $V_1 > V_3$, $V_4 > V_2$ を仮定する。
- ⑥ 人間の判断はその行動によって得られる利益が最大となるようになされることを仮定する。

なる六つの条件である。いま $var(H) = 1$ と仮定し、また

$$\beta = \frac{V_4 - V_2}{V_1 - V_3} \cdot \frac{Pr(\bar{S})}{Pr(S)}$$

とよくと V_i の期待値

$$\begin{aligned} E(V) = & V_1 Pr(R|S) Pr(S) + V_2 Pr(R|\bar{S}) Pr(S) \\ & + V_3 Pr(\bar{R}|S) Pr(S) + V_4 Pr(\bar{R}|\bar{S}) Pr(\bar{S}) \end{aligned} \quad (6.3)$$

を最大にする条件は、式(6.1), (6.2)を用いて、

$$\beta = \frac{N[c; d', 1]}{N[c; 0, 1]} = \exp\left[cd' - \frac{d'^2}{2}\right] \quad (6.4)$$

であることが導かれ、これより

$$C_{\max} = \frac{\ln \beta}{d'} + \frac{d'}{2}$$

が得られる。これを式(6.1) (6.2)を変形した式に代入すると

$$Pr(R|S) = 1 - N\left[\frac{\ln \beta}{d'} - \frac{d'}{2}; 0, 1\right] \quad (6.5)$$

$$Pr(R|\bar{S}) = 1 - N\left[\frac{\ln \beta}{d'} + \frac{d'}{2}; 0, 1\right] \quad (6.6)$$

となることが導かれる。図6.1は式(6.5), (6.6)を d' , β のいろいろな値について図示したものである。この図では横軸に $Pr(R|\bar{S})$, 縦軸に $Pr(R|S)$ が目盛られており, 等しい d' は $Y=X$ に平行な直線群, 等しい β は $Y=\pm X$ を漸近線とする直角双曲線群で表わされる。この図から $Pr(R|\bar{S})$, $Pr(R|S)$ が与えられると神聖活動量 d' が直ちに求められる。

以上は信号の有無(S, \bar{S})とその知覚(R, \bar{R})に関するモデルであるがこれを二つの音韻 A, B 間の異聴現象に拡張して適用することが可能である。すなわち異聴現象においては

$$Pr(A|A) + Pr(A|B) = Pr(A)$$

$$Pr(B|A) + Pr(B|B) = Pr(B)$$

であって $Pr(A)$, $Pr(B)$ はあらかじめ与えられているので, $Pr(A|A)$, $Pr(B|B)$ が与えられれば $Pr(A|B)$ と $Pr(B|A)$ は定まる。 $Pr(R|S)$ の代りに $Pr(A|A)$ と, $Pr(R|\bar{S})$ の代りに $Pr(A|B)$ を用い, 上記検出モデルを適用すれば神聖活動量 d' を求めることが出来る。

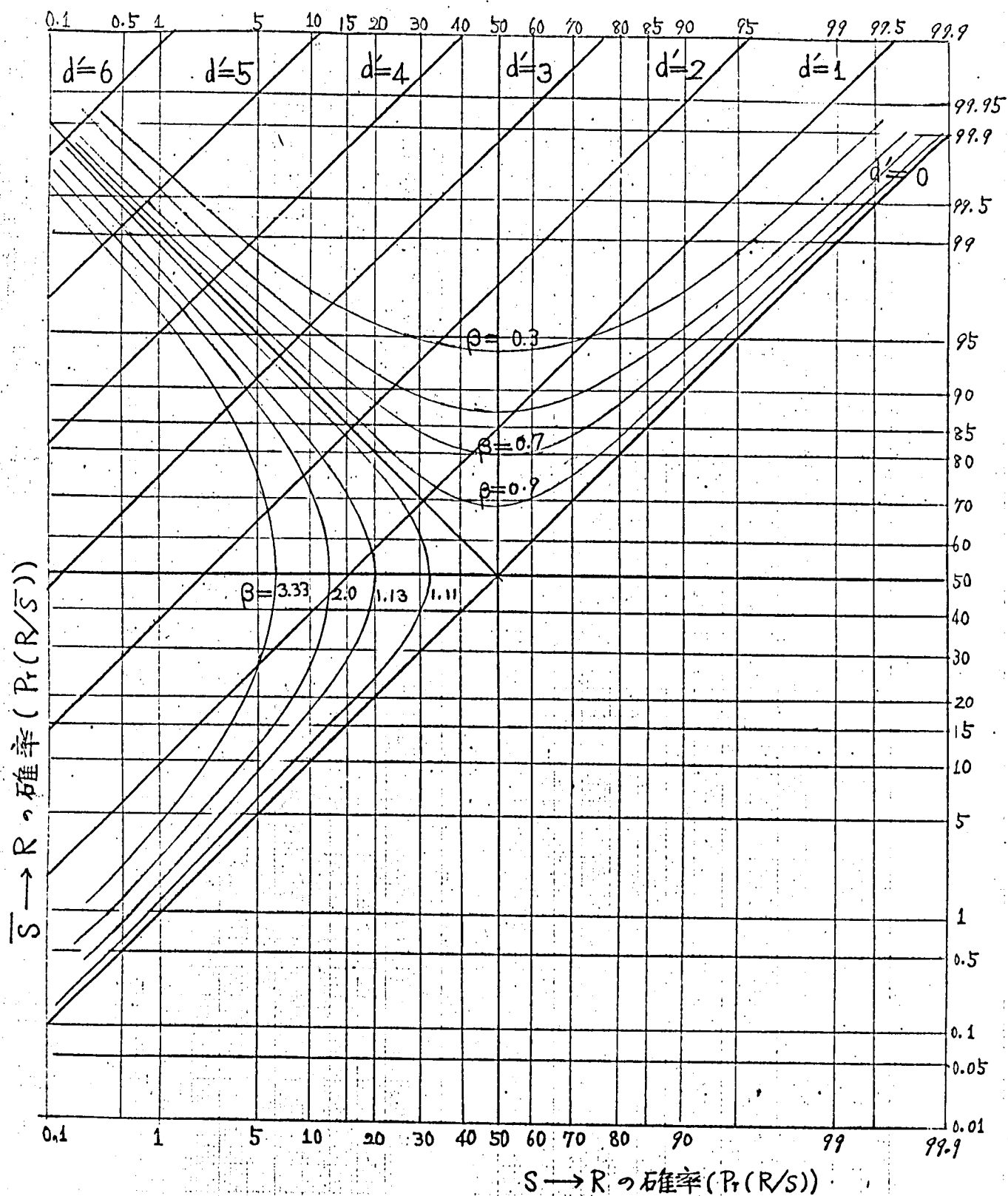


図6.1 $Pr(R/S)$ と $Pr(R/\bar{S})$ から d' , β を求める図

結局、異聴表がマトリックス

$$\begin{pmatrix} \Pr(A|A) & \Pr(A|B) \\ \Pr(B|A) & \Pr(B|B) \end{pmatrix}$$

で表わされているとき上記の検出モデルを用いれば異聴の大小を表わす単一の量 d' におき換えることが可能となり、これは一種の A, B 間の距離を表わすものと考えられる。 A, B は音韻そのものであり、或は音韻グループでもよく、また A, B 間の異聴は実際にそれぞれの組合せについて実験されなくても、主異聴表から定比則⁽⁴⁾により $\Pr(A|A), \Pr(A|B)$ を導くことができることが知られている。

このようにして導入された神聖活動量 d' が、PCM 系の異聴を調べる上で有効な方法であることは次節以下で具体的に示そう。

6.4 PCM系の母音異聴評価

母音の明りよう度は子音の明りよう度に比較して一般に高く，従って異聴頻度は僅少である。しかしPCM系のひずみや直通系の雑音を多くしてゆくと明りよう度が漸次低下する。このような明りよう度特性を異聴表によってより詳細に調べてみると，5母音の中にはおたがいに混同を生じ易い母音と，生じ難い母音があることがわかる。この混同性をより簡潔に表示するため副異聴表を作成し，これに信号検出の理論を適用して d' を求めることを試みよう。

音韻異聴においては定比則がよく成立することと F.R.Clark が示した⁽⁴⁾。これは音韻種の多い主異聴表から，音韻種の少ない場合の副異聴表を推定する方法で，主異聴表(M)の要素を $P_M(a_R | A_i)$ とすれば，副異聴表(S)の要素 $P_S(a_R | A_i)$ は

$$P_S(a_R | A_i) = \frac{P_M(a_R | A_i)}{\sum_R^S (a_R | A_i)} \quad (6.7)$$

で与えられる。ここで \sum_R^S は主異聴表の要素を副異聴表の受聴列のみに着目して和を求めることを意味する。この仮定を用いて，5母音についての異聴表から任意の2母音を信号音韻とする場合の異聴表を誘導することが出来る。これに前節で導入した信号検出のモデルを適用して，母音の混同性を d' で表現することが可能である。

異聴表の結果から，PCM系においても直通系においても $/i/$ と $/u/$ の異聴が最も大きく，次に $/e/$ と $/o/$ の異聴が大きいことがわかる。これらの異聴の程度を d' によって表示し図6.2，図6.3 にしめす。

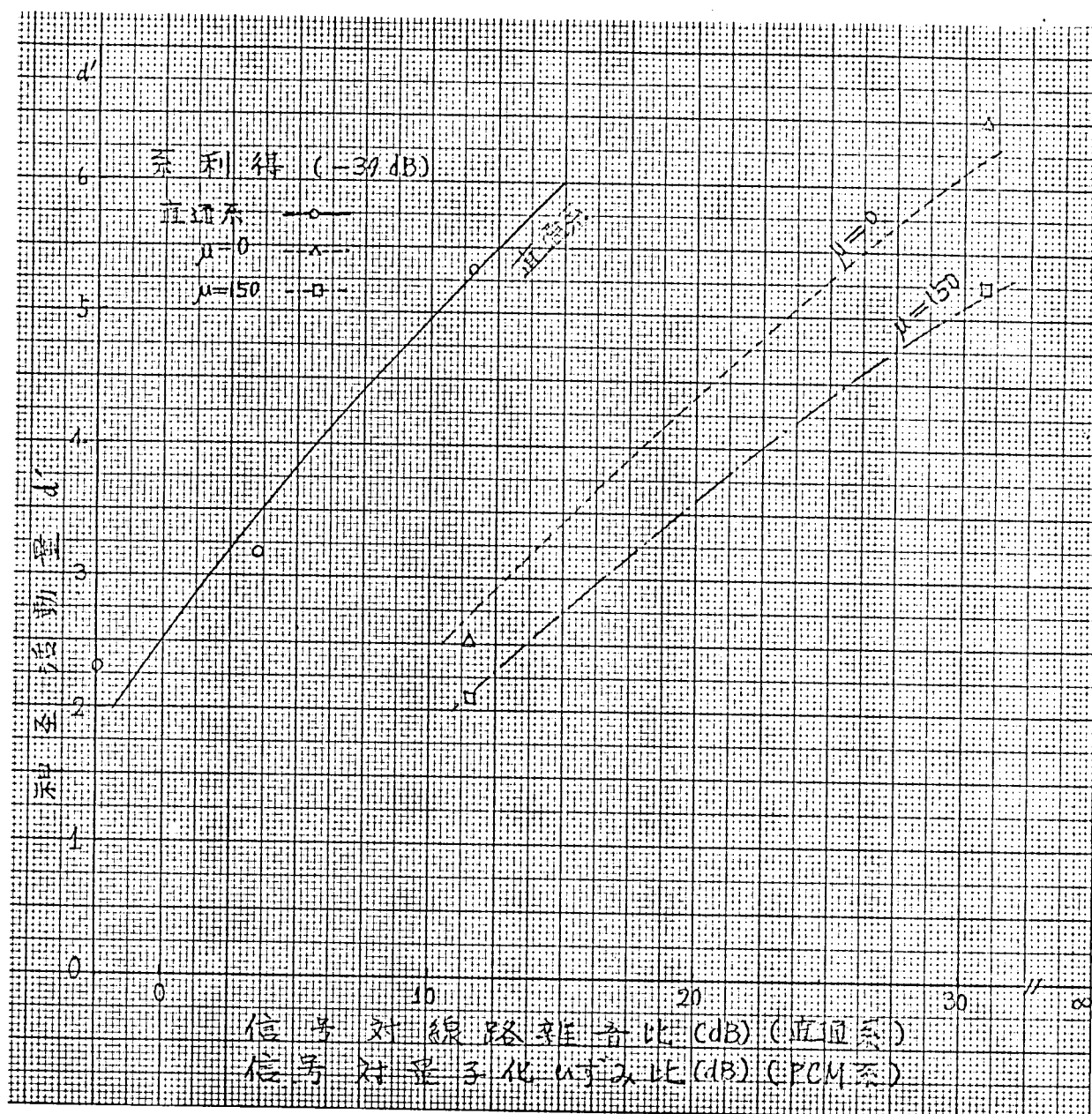


图 6.2 母音 e-o 的 d'

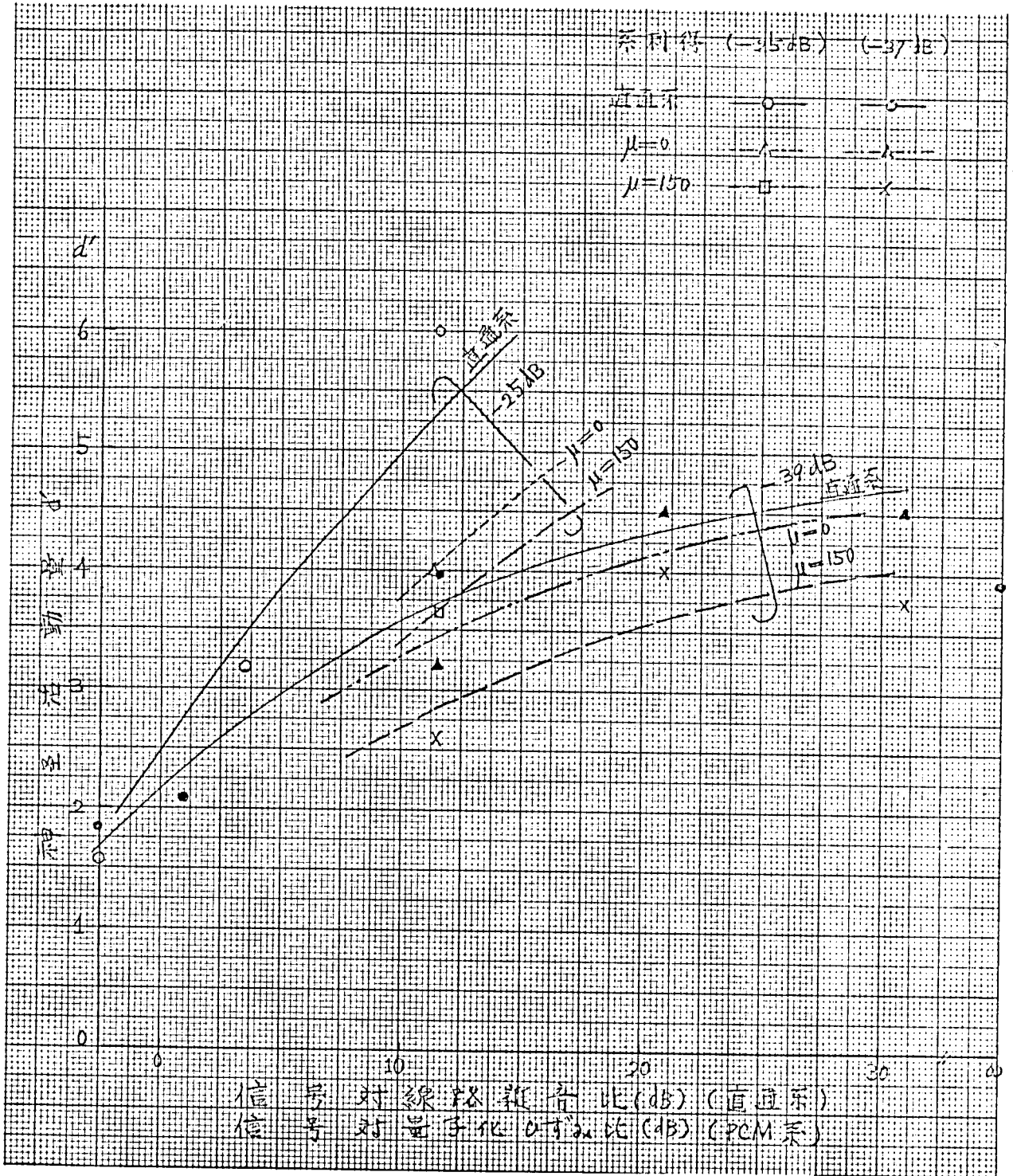


图 6.3 母音 i - u 及 d'

図6.2は /e/-/o/ の場合、図6.3は /i/-/u/ の場合であって、これ以外の組合せでは異聴の程度が過少であるので $\mu > 6$ となる。図6.2, 図6.3では量子化ひずみと同レベルの線路雑音による異聴と比較できるように直通系の線路雑音の場合の異聴結果とも同時に示してある。

図6.2, 図6.3の結果からただちに ① /e/-/o/ ならびに /i/-/u/ の異聴において、直通系の雑音よりも PCM系のひずみの方が異聴の程度が甚だしく、

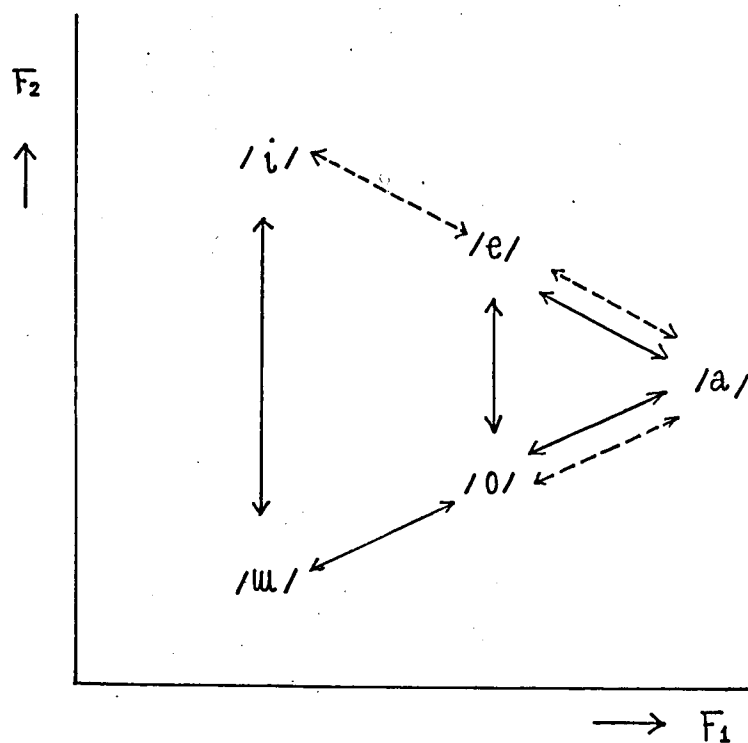


図6.4 F₁-F₂図による異聴傾向の説明

② PCM系のひずみの中では $\mu=150$ の方が $\mu=0$ の場合よりも異聴が甚だしいことがわかる。そのことから次のような結論が導かれる。すなわち各母音の μ_1 , μ_2 ホルマントによる表示を行った図6.4を参考にすると, /i/-/u/, /e/-/o/

の異聴はいずれも第2ホルマントの情報が失われることによって生ずるものと考えられるが、図6.2、図6.3においてPCM系の方が異聴が大きいことから、PCM系のひずみが第2ホルマントにより大きな損傷を与えていることがわかる。しかしこのことを基礎づける根拠などについては必ずしも明らかではない。

6.5 PCM系の子音異聴評価

子音は母音にくらべその種類が多く、かつ母音のような定常性に欠けているので異聴現象も複雑である。第6.2節において示した明りょう度試験用の基本音韻を音声学における分類を考慮して分類すると第6.1表のようになる。ここで

番号	子音グループ名	音 韻 名
1	無声閉鎖音	/p/ /t/ /k/
2	無声摩擦音	/ts/ /tʃ/ /s/ /ʃ/ /h/
3	有聲閉鎖音	/b/ /d/ /g/
4	有聲摩擦音	/dz/ /dʒ/ /r/
5	通 鼻 音	/m/ /n/
6	過 渡 音	/j/ /w/

表 6.1 子 音 の 分 類

/ts/ および /tʃ/ は普通 破擦音と呼ばれて 閉鎖音と摩擦音の中間的性質を持つとされているが、ここでは摩擦音のグループに含めた。また /r/ は普通 半母音として取扱われているが、その波形あるいは異聴傾向から見て 有聲摩擦音に分類した。

子音の明りょう度特性の内容を異聴表によってしらべると、もっとも大きな着しい特徴として、子音には幾つかのグループがあって、このグループ内では異聴が起りやすいが、グループ間では異聴が少いという現象がしばしば見られる。このような異聴現象のグループは音声学における分類と対応しており、そのもっとも顕著なものには、無声音と有声音のグループ、有聲濁子音と半母音のグループなどがある。さらにグループが細分化されるにつれて個々の音韻のグループ間の異聴が増加して来て、最終的に主異聴表が得られる。このような事実にもとづいて子音の識別過程を図6.5のように表わして見る。ここで U は無声音 (unvoiced sound), V は有声音 (voiced sound), S は閉鎖音 (stop sound), F は摩擦音 (fricative sound), T は濁子音 (turbulent sound), NT は半母音 (non-turbulent sound), N は通鼻音 (nasal sound) とあらわす。

この識別過程は大部分が 2 着択 1 の形式となっており、これに信号検出のモデルを拡張して適用することができる。まず無声音 U と有声音 V の識別について異聴表における値から

$$(1) \sum_{i=1}^n P_r(U_i | u_i) \dots\dots\dots \text{無声音を無声音とする確率}$$

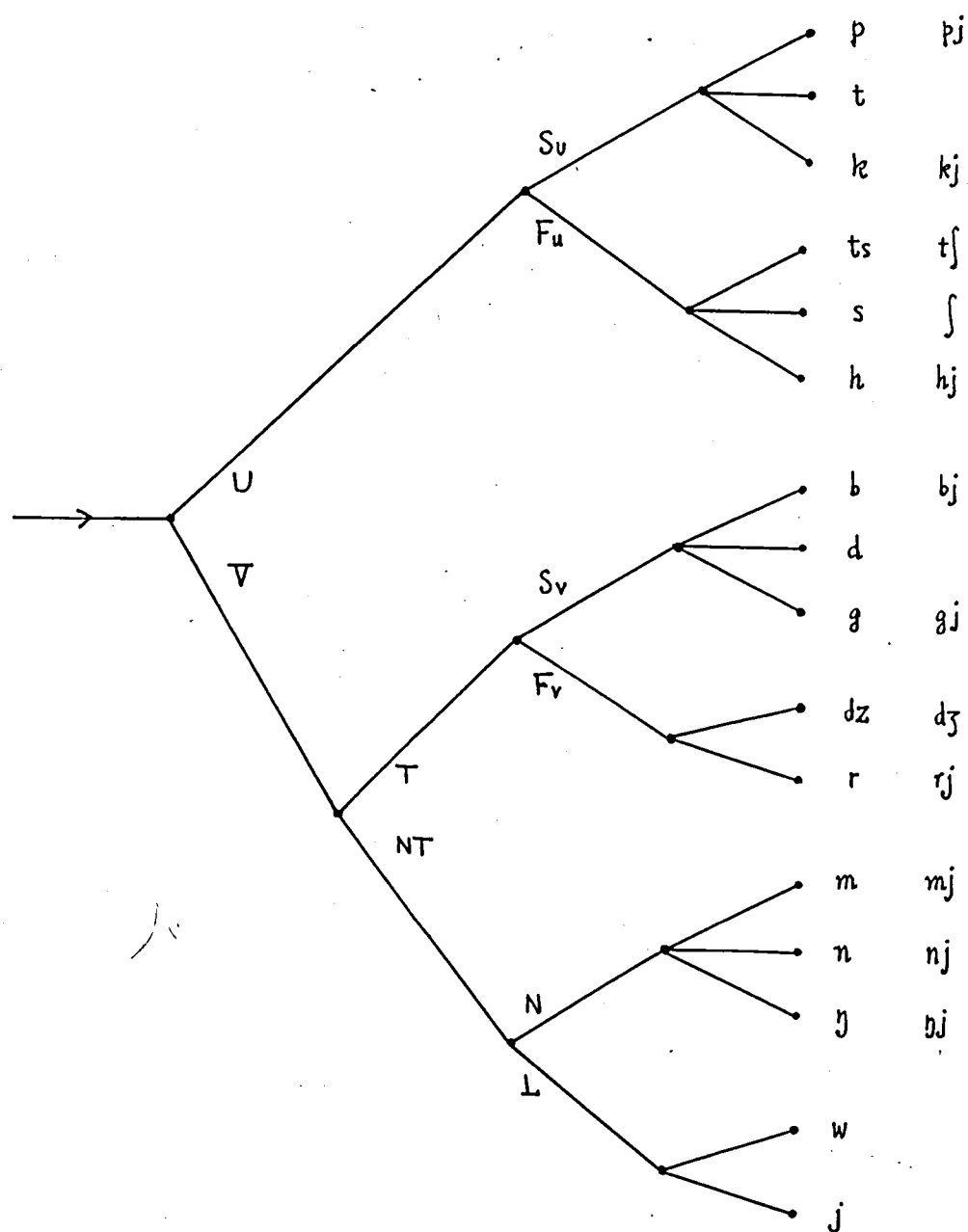


図6.5 子音識別過程の樹状表現

$$(2) \sum_l^u \Pr(V_k | u_i) \dots\dots\dots \text{無声音を有声音とする確率}$$

$$(3) \sum_l^v \Pr(U_m | v_l) \dots\dots\dots \text{有声音を無声音とする確率}$$

$$(4) \sum_l^v \Pr(V_n | v_l) \dots\dots\dots \text{有声音を有声音とする確率}$$

を算出する。ただし異聴表において /・/ とする受聴判断はこれを他のすべての子音にその送話頻度に応じて分配し、かつ /・/ を送話子音から除去して異聴表を閉マトリックスの形式に修正した上で上記の計算をおこなった。 /・/ とする受聴判断は "信号がない" 或いは "信号がわからない" とする判断であって、もし、 "信号がわからない" とする判断と認めないとする強制選択法を採用すると、もともと子音はその種類が多いので受聴判断に被験者による偏りがつけ加わるおそれがあるので、ここでは測定時にはこの判断を認めておいて、あとでこれを配分し直すという操作を行うこととした。なお拗子音で /j/ と判断された異聴は /・/ の受聴として異聴表を修正した。2着択1過程における識別は同様の方法で調べてゆくことができる。以下図6.5における幾つかの2着択1の判断過程において、PCM系のひずみと直通系の線路雑音の相違と、前述の神聖活動量 d' をもちいて比較してらべた結果について述べる。

6.5.1 無声音と有声音の異聴 (U-V)

図6.6 に 無声音(U)と有声音(V)の グループの異聴を示す。図6.6の結果では、量子化のずれによる妨害は線路雑音による妨害よりも明かに少い。この理由については、この両者の間に 時間構造上の違いがあって、量子化のずれはこれらの違いをかえって強めるような影響があるためと考えられる。

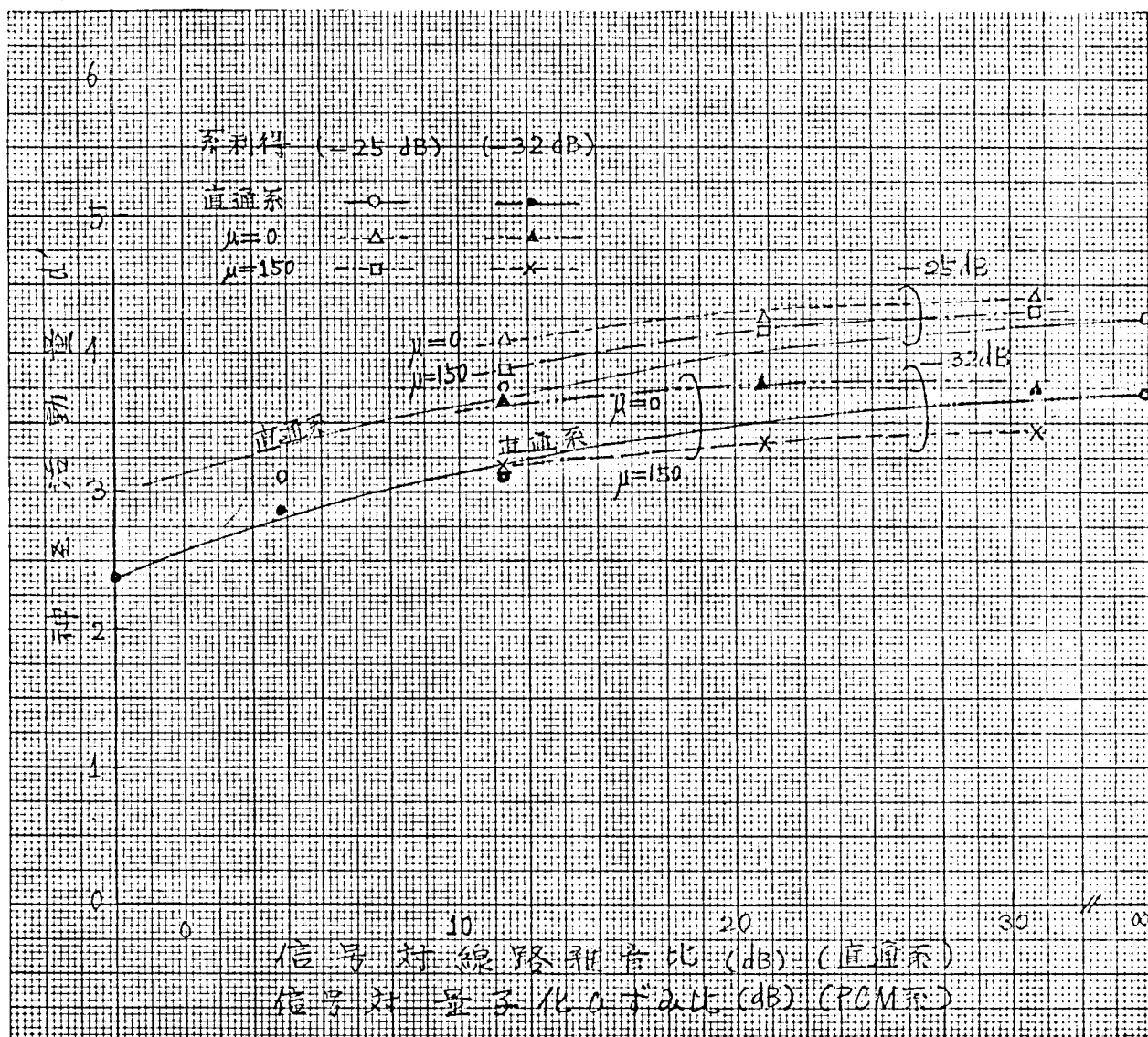


図6.6 子音 U-V の d'

6.5.2 濁子音と半母音 (T-NT) の異聴

濁子音 (T) と 半母音 (NT) の間の異聴を図6.7に示す。この図の結果では雑音による妨害と量子化ひずみによる影響とはかなり一致しており、また量子化ひずみの影響についても μ の値によってあまり大きな差が認められない。この性質は有声音グループ間に共通に見られる性質であって、時間構造および周波数構造上の差が有声音グループの間には顕著に存在しないことによるものと考えられる。

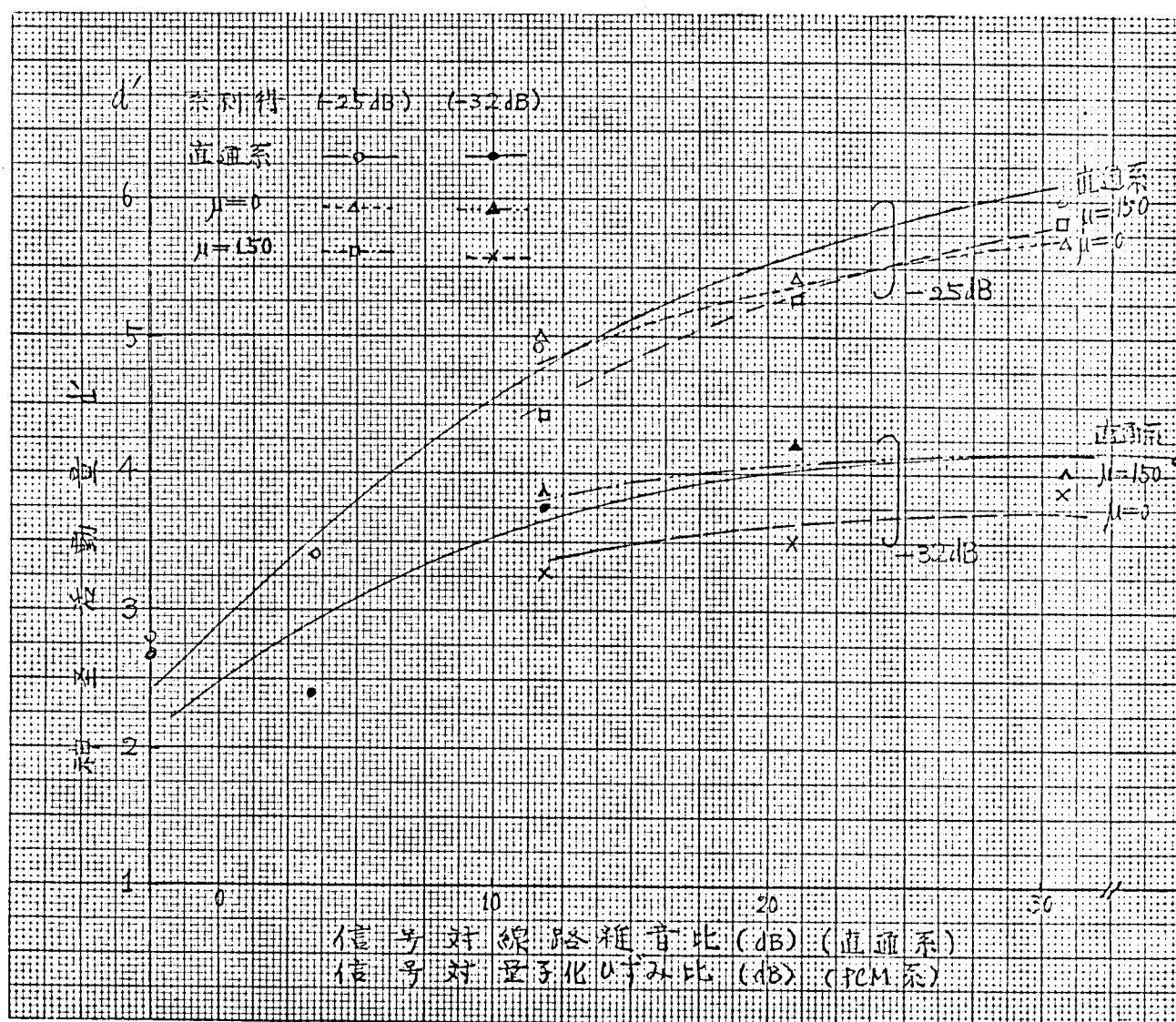


図 6.7 子音 T-NT の d'

6.5.3 無声閉鎖音と無声摩擦音 ($S_u - F_u$) の異聴

無声閉鎖音 (S_u) と 無声摩擦音 (F_u) の間の異聴を図 6.8 に示す。図 6.8 においては、量子化ひずみの影響についてビット数による変化がほとんど認められず、ほぼ一定の値に保たれているのに対し、雑音による d' の変化は他のグループの場合と同じくかなりの程度認められる。このため高ビットでは PCM 系の量子化ひずみによる妨害効果は直通系の雑音による妨害効果より大きいのに対し、低ビットでは逆に雑音の妨害効果の方が大きくなってゐる。このような特異な現象の見られる理由については、量子化ひずみが閉鎖音と摩擦音の間の時間構造の差異に妨害を与えないためと考えられる。これは丁度量子化ひずみが母音の異聴において著しい妨害を与えたのに対応する現象であると考えられ、周波数構造の差異によって識別が行われるグループの場合と、本項のような時間構造の差によって識別が行われるグループの場合とでは、量子化ひずみの影響に明らかな傾向の差がある。

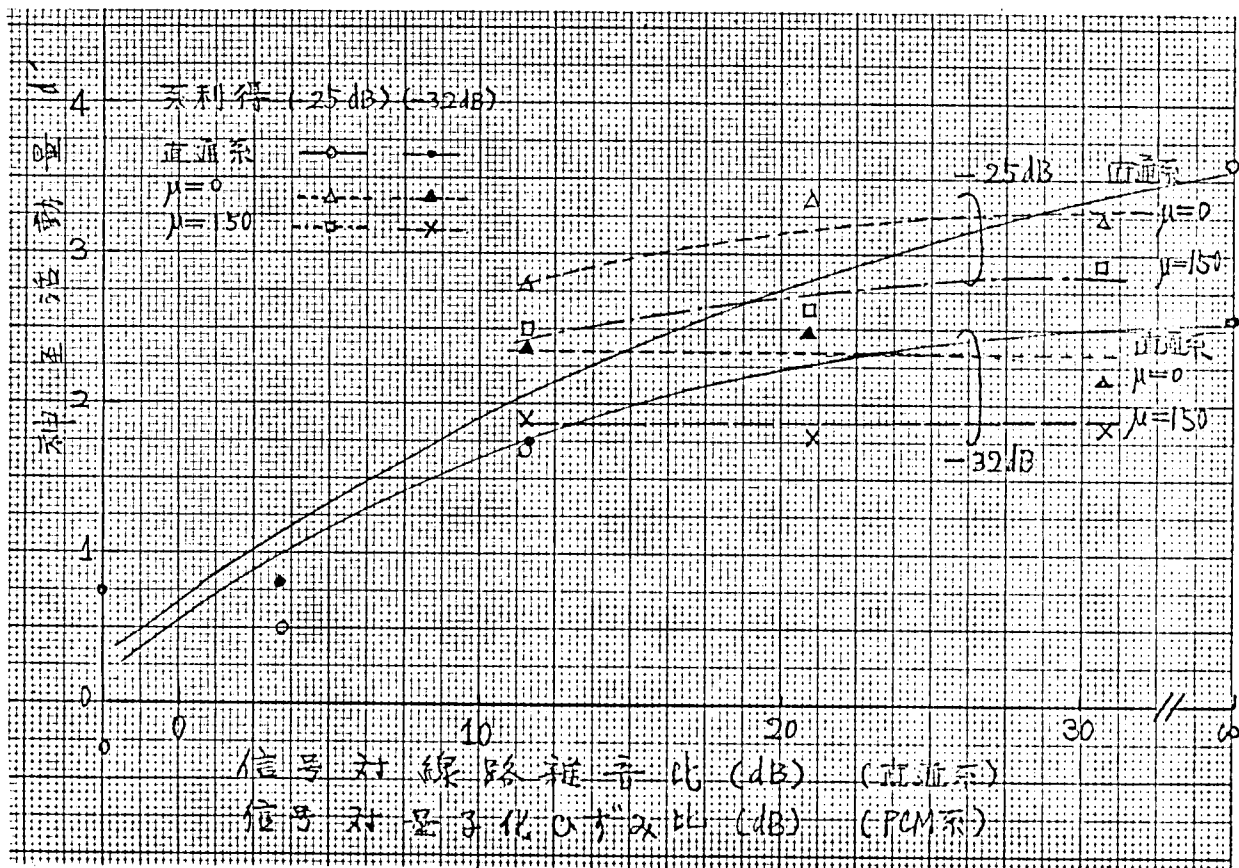


図 6.8 子音 $S_u - F_u$ の d'

とがわかる。

6.5.4 有声閉鎖音と有声摩擦音 ($S_V - F_V$) の異聴

有声閉鎖音 (S_V) と有声摩擦音 (F_V) の間の異聴を図 6.9 に示す。この場合は前項でみられたような量子化 μ すみの特異な性質はもはや見られず、 d' の変化は PCM・直通両系では一致している。この理由は前項において説明した閉鎖音と摩擦音の間の時間構造の差にもとづく d' の性質に有声音の場合にみられたような d' の逆の変化が加わって打消し合うためと考えられる。

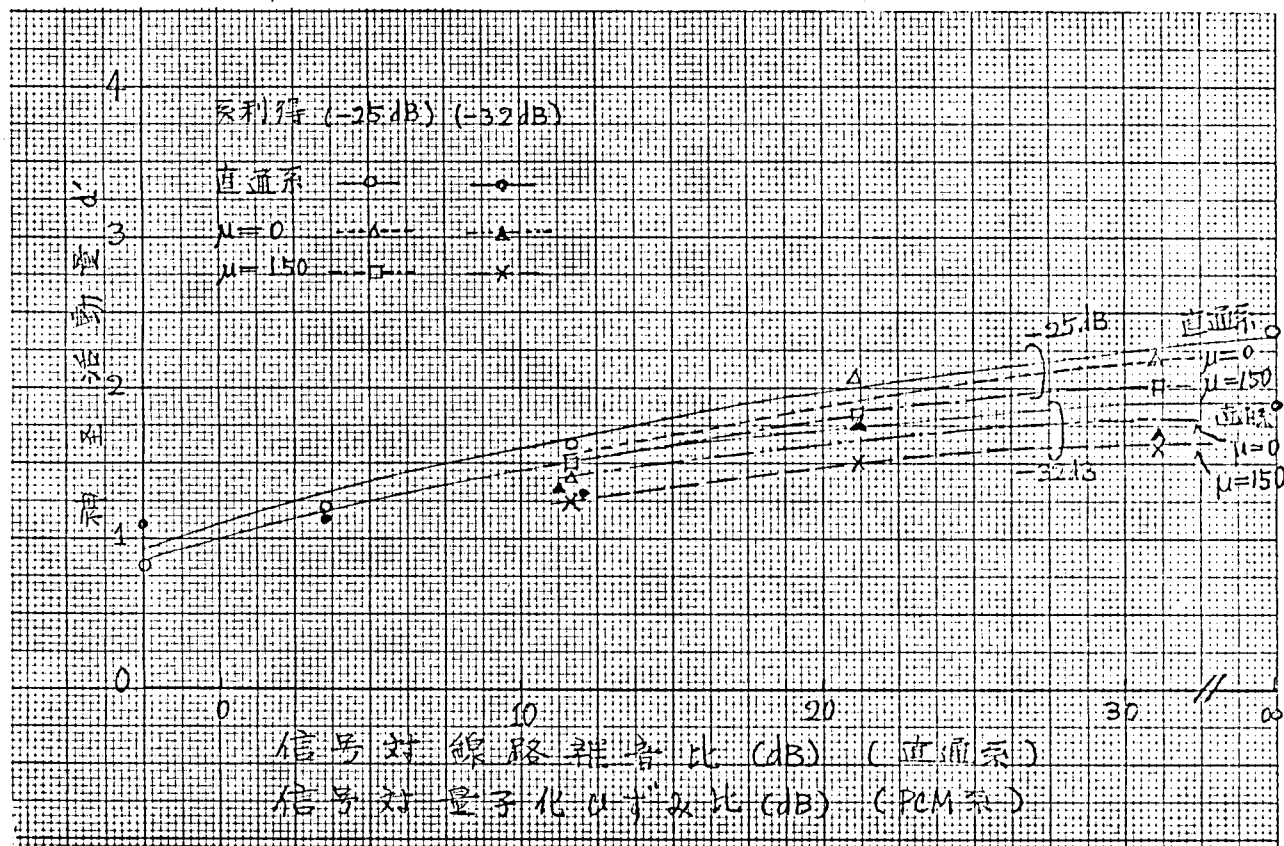


図 6.9 子音 $S_V - F_V$ の d'

6.5.5 過渡音と通鼻音(L-N)の異聴

過渡音(L)と通鼻音(N)の間の異聴を図6.10に示す。図6.10より過渡音と通鼻音のグループ間では、母音の場合ほど顕著ではないにしてもPCM系の妨害効果が線路雑音の妨害効果よりやや上廻っており、有声音グループ間によって見られる共通の性質を示していることがわかる。

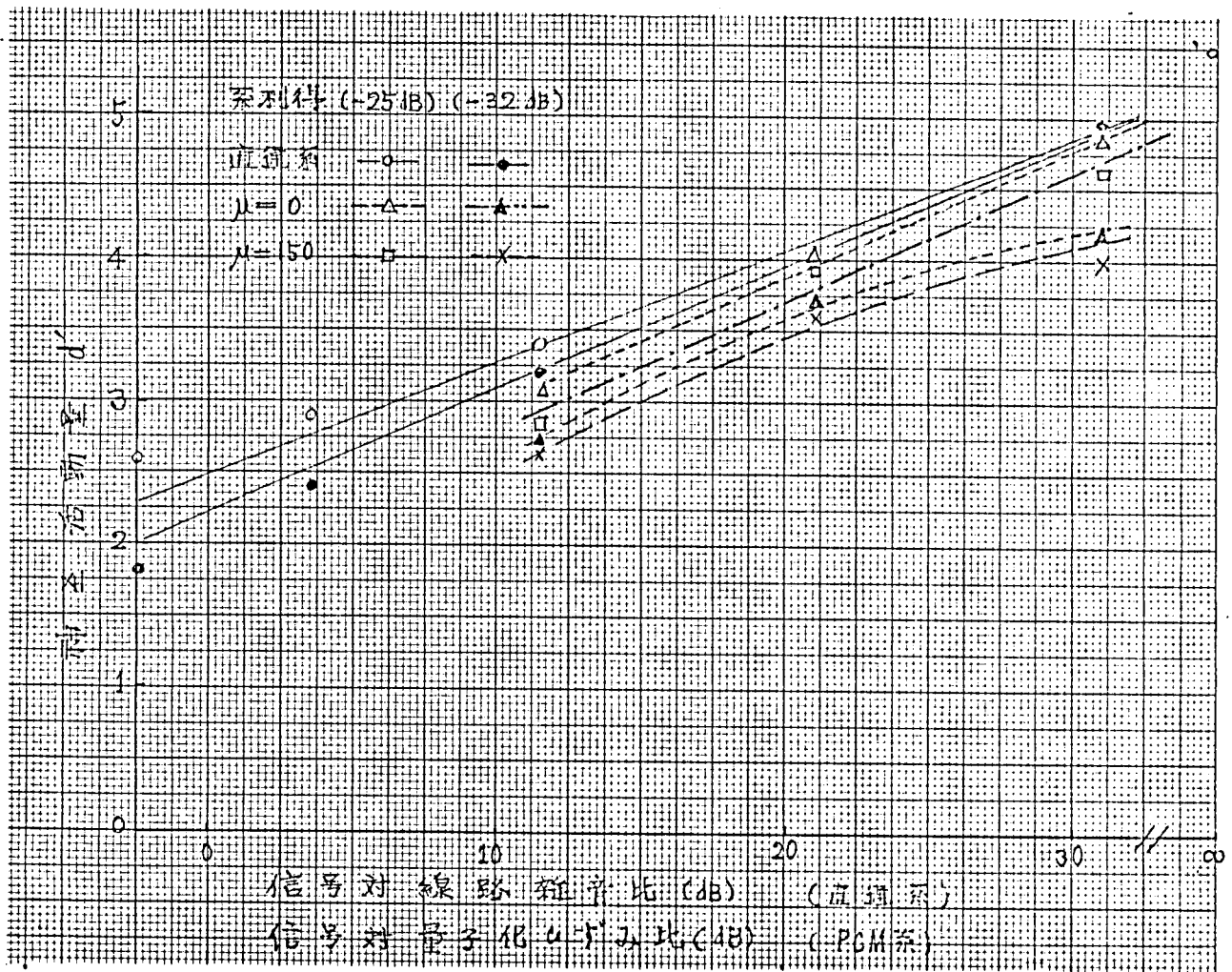


図6.10 子音L-Nの d'

6.6 結論

以上の結果を通じて量子化ひずみによる母音の異聴は /i/-/u/, および /e/-/o/ の間において顕著に生じ、ひずみと同レベルの線路雑音によって生ずる異聴と比較して異聴の程度が甚だしいことが明らかにされた。また子音の場合には無声音と有声音、無声閉鎖音と無声摩擦音の場合には同レベルの線路雑音と比較して量子化ひずみの異聴に特異な性質がみられ、その他の場合には、それほど大きな差は認められなかった。

これらの理由については、量子化ひずみは時間構造における特徴を比較的よく保存するが、有声音のグループ間における周波数構造を比較的損傷する性質のあることにより説明される。ただしこれらの詳細な根拠については現在まだ十分明らかでなく、今後の研究にまつ英が多い。今後はこのような異の検討と、評価方法として何らかの方法により子音の各グループ内での異聴の程度と評価することが残された問題である。

第7章 PCM系の各種通話品質尺度による評価の相互比較

7.1 概論

一般に電話系の通話品質を測定するための尺度としては、通話の音韻性に着目するものと、音色に着目するものに大別できる。音韻性に着目する尺度としては単音明りよう度があり、この尺度は通信の伝達に関する基本的に重要な性質に着目した尺度であることと、再現性や精度などにおいてすぐれているところから、従来電話系において通話品質の主たる尺度として用いられて来た。一方音色に着目する尺度としては、オペニオンやプレファレンスなどが挙げられるが、これらは明りよう度に対する補助尺度として用いられ、電話系のいろいろな条件のもとで明りよう度との関係が調べられて来た⁽¹⁾。

前章までの各章において、PCM通信方式における各種パラメータが通話品質におよぼす影響について単音明りよう度と中に総合的な評価を行ったが、本章では明りよう度以外の二、三の尺度によってPCM系における各種パラメータの影響を測定し、明りよう度との関係を明らかにすることを試みた。

7.2 種々の通話品質尺度

音色に着目した尺度としては種々のものが考えられているが、ここではオペニオン、プレファレンスおよび臨界雑音の3尺度をとり上げた。これまでの各章で単音明りよう度を用いてPCM系の波形ひずみの影響を評価した際には、PCM系の品質劣化は、これと品質劣化量の等しい直通系の雑音すなわち明りよう度等価雑音におきかえて評価した。等価雑音表示は波形ひずみによる品質劣化量を

表現するに有効な方法と考えられるので、ここでは上記3尺度による品質劣化量をすべて雑音レベルで表現することを試みた。以下本節ではこれらの3尺度について説明する。

7.2.1 オピニオン

オピニオン尺度は対象となるものの品質を主観的判断に基づいて幾段階かの範ちゅうにクラス分けし、この判断試行を多数の被験者によって繰返し、各範ちゅうの評定の平均値を最終評定値とする尺度である。通話回線の場合には通常5段階法が用いられる。すなわち評価の範ちゅうを5段階設け、評価の手びきとして最上位には通話回線として「非常にいい」、オ2段階には「いい」、オ3段階として「まあいい」、オ4段階として「悪い」、最下位に「非常に悪い」なる五つの評語を付与する。評価点数はそれぞれ最上位から4点、3点、2点、1点、0点とする。

7.2.2 プレファレンス

プレファレンスは音色の好ましさに着目する尺度であって、ここではPCM系の信号と、雑音を加えた直通系の信号とを対にして提示し、被験者に対して「いずれが電話通話として好ましいかを判定させ、得られた結果から好ましさの等しい対の関係を図系について求めた。この方法では信号音の提示回数はおピニオン尺度に比較して多くしなければならないが、その反面相対判断を用いているため、オピニオン尺度においてみられたような判断基準の変動に基づく実験結果のばらつきが少いという利点がある。

7.2.3 臨界雑音

臨界雑音とは直通系回線に白雑音を混入した試験音とひずみのある通話回線に同量の白雑音を混入した試験音とを対にして提示したとき，両回線の音色が区別出来る限界の白雑音をいう。この尺度は線路雑音がある閾値レベルより低いとき，波形ひずみは線路雑音と分離して検知され，域値レベルより高いと雑音から分離できないことに着目し，直通系との比較によってこの限界の閾値を厳密に求めようとするもので，線路雑音との独立性の側面を表現している。また，波形ひずみに対する一つの有効な尺度と考えられる。また，プレファレンスと同様にこの場合も対比較法によっているため，判断基準の変動に基づく実験結果のばらつきが少なく，再現性においてすぐれているといえる。

以上の3尺度のうちで，プレファレンスおよび臨界雑音はすでに述べたように雑音レベルで表示されているから，オピニオン尺度についても直通系との比較によって等価雑音を誘導し，これらの尺度による測定結果をすべて信号対雑音比として表示することにより，すでに求めた信号対明りょう度等価雑音比による結果とこれらの結果とを直接に比較することが可能となる。

7.3 実験条件

通話品質の測定に用いた試験回線は第2章, 2.1節に述べた日本主通話標準装置による標準通話系試験回線であって, その構成図は図2.4に示した通りである。またPCM装置は2.2節で述べたPCMモデル装置である。

実験条件は信号量子化ビット数が7, 5, 3ビット, 標本化周波数8 kHz, 信号入力レベル-3, -13, -43 dB (過負荷正弦波基準), 圧伸特性0, 50, 100, 150, 入力雑音レベル-12.5 ~ -40 dB (入力信号レベル基準)の各組合せである。これらの条件はPCM系の通話品質を論ずる上で最も基本的なものと考えられる。

7.4 信号振幅量子化ビット数の影響

圧伸率 $\mu=100$, 信号入力レベル-13 dBの条件において, 信号振幅量子化ビット数を7, 5, 3と変化したときの実験結果を図7.1に示す。図7.1では横軸に振幅量子化ビット数, 縦軸に信号対等価雑音比をとっている。

図7.1の結果から, 通話品質におよぼすビット数の影響を各尺度ごとに調べてみると次のようなことがわかる。まず明りよう度はその信号対等価雑音比が信号対ひずみ電力比とほぼ比例の関係にあり, 他の尺度に比較し高ビットでは最もきびしい評価を与えるが, ビット数の低下にともなって評価があまり傾向があり, ここで用いた四つの尺度のうちでビット数の変化に対する信号対等価雑音比の変化が最も小さい。オピニオン尺度は, 高ビットでは明りよう度についできびしい評価を与え, 低ビットではあまり評価を与えており, 明りよう度の結果に近い。プレファレンスは高ビットで比較的あまり, 低ビットで比較的きびしい評価を与えており, 臨界雑音は高ビットで最もあまり, 低ビットで最もきびしい評価

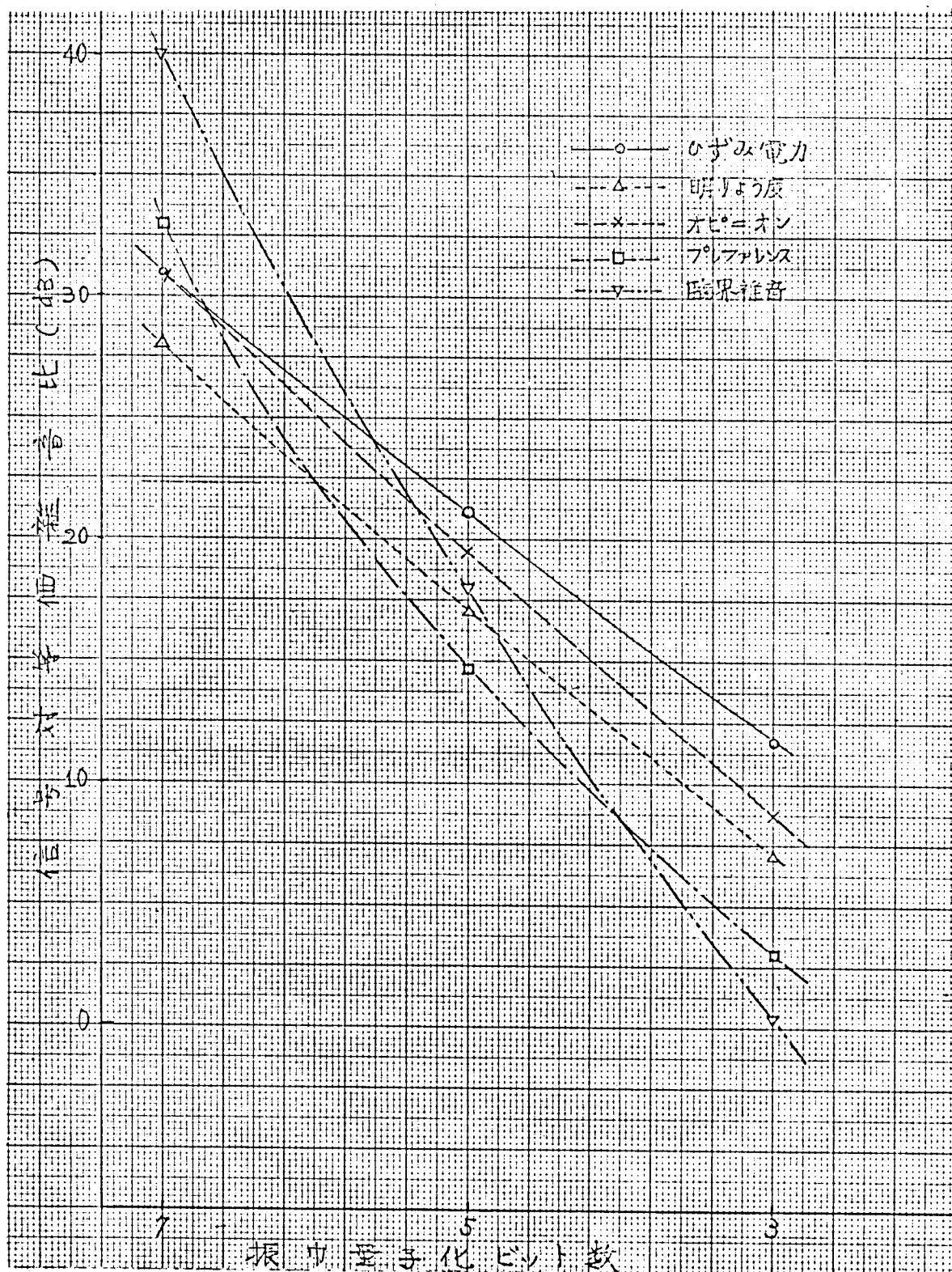


図7.1 信号振幅量子化ビット数の影響

($\mu = 100$, 信号入力レベル -13 dB)

と与えている。

結局これらのことから，高ビットで評価のきびしい尺度では，低ビットで逆に評価があまりく，また高ビットで評価のあまりい尺度では，低ビットで逆に評価のきびしくなっており，従って各尺度の相対的評価が高ビットと低ビットで逆転する性質があると結論される。

7.5 信号入力レベルの影響

7ビット， $\mu=100$ の条件で信号入力レベルを -3 ， -13 ， -43 dB と変えた場合の各尺度の信号対等価雑音比を図7.2に示す。ただし信号入力レベルは過負荷閾値の正弦波レベルを 0 dBと選んであり，信号入力レベル -3 dB においては波形ひずみのほとんどは過負荷ひずみによって占められているのに対し， -13 dB 以下の信号入力レベルにおいては波形ひずみはすべて量子化ひずみである。図7.2 から -3 dB における評価すなわち過負荷ひずみに対する評価はプレファレンスが最もあまりく，明りよう度，オビ=オン，臨界雑音の順にきびしくなっている。これに対し信号入力レベルが -43 dB の条件では臨界雑音が最もあまりく，明りよう度，オビ=オン，プレファレンスの順にきびしくなっており，オビ=オンと明りよう度の間のただ一つの例外を除けば -3 dB における評価と -43 dB における評価の間には前節で述べたと同様の逆転が生じていることがわかる。前節におけると同様に，信号対等価雑音比の変化範囲を -3 dB の入力レベルにおける信号対等価雑音比から -43 dB における信号対等価雑音比を差引いた値で表現すると，プレファレンスのみが正の値で他はすべて負の値となるが，変化範囲の大きさで比較すると，

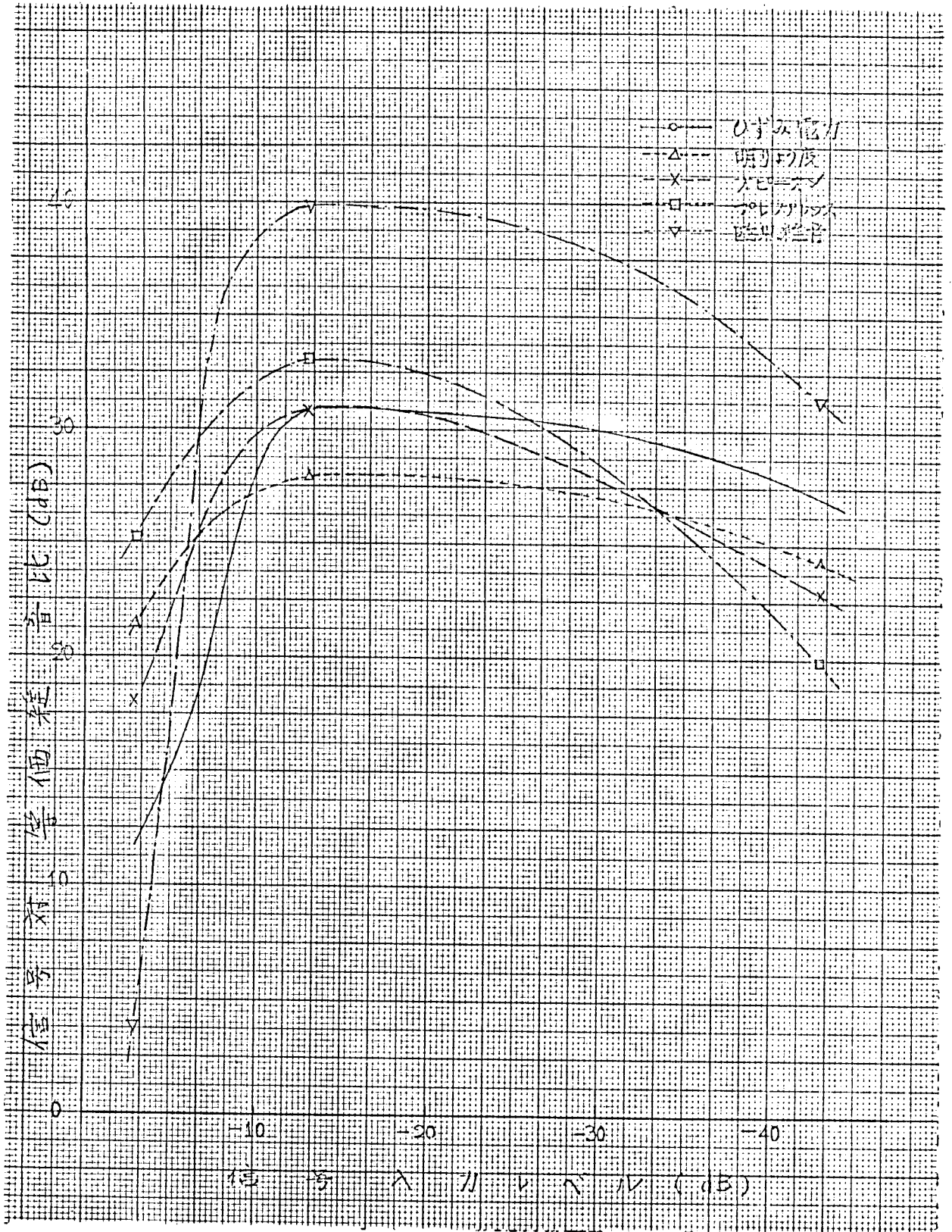


図 7.2 信号入力レベルの影響
(7ビット, $\mu=100$)

明りょう度が最も小さく，オピニオン，プレファレンス，臨界雑音の順に大きくなっており，この結果は前節で見られた通話品質尺度の目盛りの粗さ^{*}の順位と一致している。ただしこの結果は量子化ひずみと過負荷ひずみの混在する条件および量子化ひずみのみの条件について，単に入力レベルの両端の値として取り上げ，その変化の絶対値のみに着目しているので，ひずみの条件が全く同じではないことに注意しなければならぬ。

7.6 圧伸特性の影響

7ビット，信号入力レベル -13 dB の場合について対数圧伸率 μ を0, 50, 100, 150の4通りに変えて各尺度の信号対等価雑音比を求めた。その結果を図7.3に示す。図7.3によれば μ が0から150に変わる間に前節と同じく評価のきびしさあまの臭でほぼ逆転した関係がみられる。すなわち μ が大きくなると最もきびしいものから列挙すると，明りょう度，オピニオン，プレファレンス，臨界雑音の順であるが， $\mu=0$ のときこの順序は臨界雑音，プレファレンス，明りょう度，オピニオンの順になりほぼ逆転していることになる。このような評価の逆転の現象はすでに前節および前々節においても同様に見られたわけであって，尺度の相互比較において見られる一つの特徴的な性質と思われるが，その究明は今後に残された問題である。

註*) すなわち前節の結果において臨界雑音は評価の変動幅が4尺度中最大であるので，通話品質としての目盛りが最も粗く，逆に明りょう度は目盛りが最もこまかいと見なすことができる。

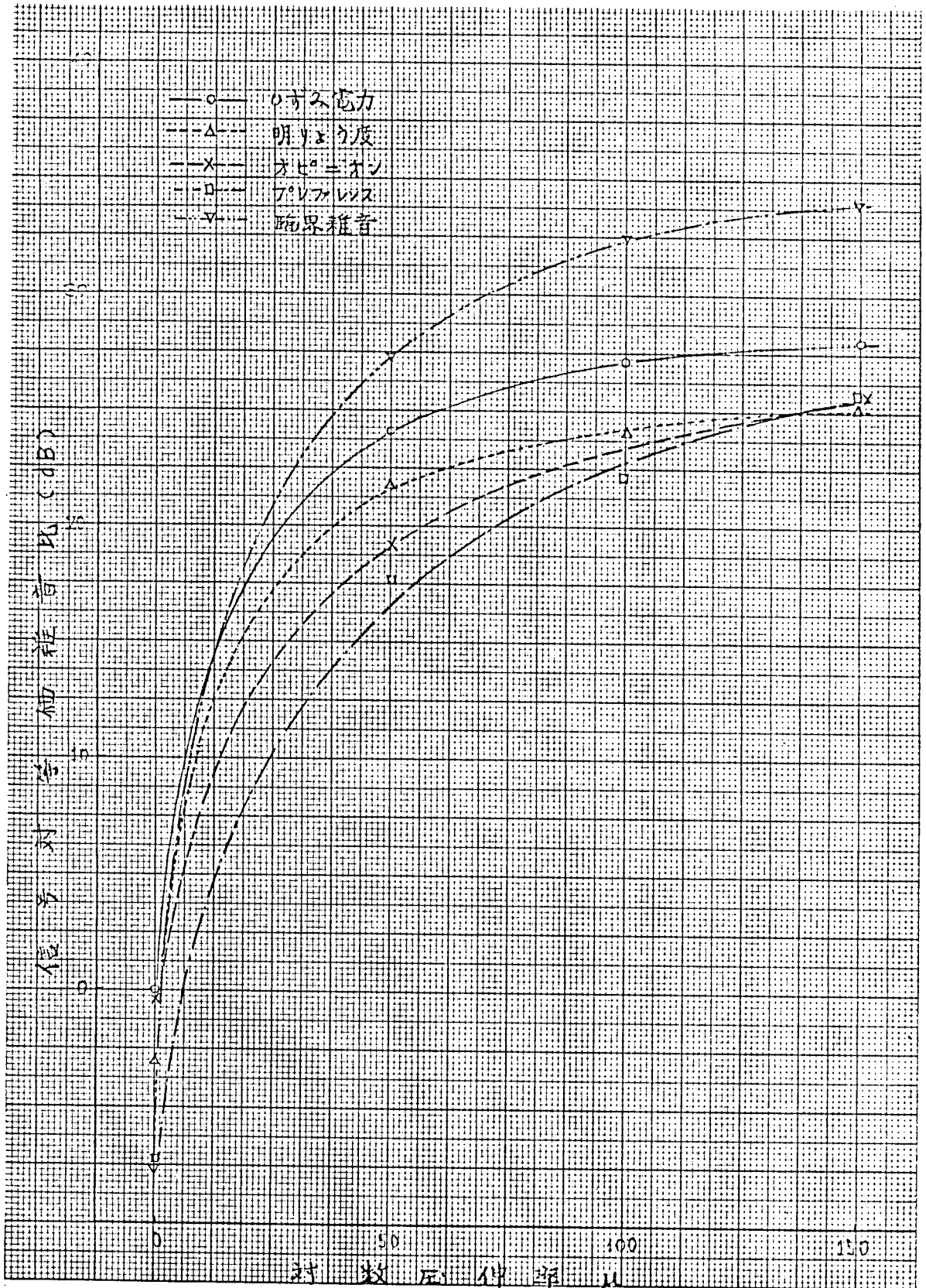


図 7.3 圧伸特性の影響

(7ビット, $\mu=100$, 信号入力レベル -13 dB)

7.7 線路雑音の影響

ここではPCM系における線路雑音の影響について調べる。雑音が重畳した音声
を量子化すると、そのせいで通話妨害成分として音声の量子化ひずみ成分と雑
音の量子化された成分などが現れる。これらは通話品質を劣化させるので品質測
定結果から等価雑音が誘導できる。この等価雑音から入力雑音成分を差し引けば
雑音が重畳した音声を量子化することによるひずみ成分の等価雑音だけが残る。
図7.4はこのような手続きによって誘導されたひずみ成分の等価雑音レベルと入
力線路雑音レベルとの関係を、横軸に信号対線路雑音比、縦軸に信号対等価雑音
比をとって表示したもので、実験条件としては振幅量子化ビット数7.5, 3ビット、
信号入力レベル-13dBをえらんだ。図7.4の結果から、明りょう度は概して平
坦、オピニオンとフレファレンスは右下りの傾向を示している。この平坦部分の
明りょう度等価雑音レベルは、雑音のない時の量子化ひずみの明りょう度等価雑
音レベルに一致し、かつその等価雑音レベルは線路雑音レベルによって変ること
はない。言いかえればこの平坦部分は、等価雑音と線路雑音の相乗効果が現れな
い部分である。一方右下りの部分は線路雑音の相乗効果の現れた部分であって、
雑音が多くなればなる程量子化ひずみそのものの影響を弱めようとする方向に効
果が働くことを示している。このような効果は、音声に量子化操作を加える前に
雑音を重畳すると音声の量子化レベル点がゆれ動き、量子化レベル点近傍の情報
が時間的に特定の振幅レベルに集中することなく伝送されるため、量子化による
妨害が見かけ上減少することによるものと考えられる。またこの効果は明りょう
度では信号対線路雑音比が20dB以下の条件でや、弱く現れているが、他の

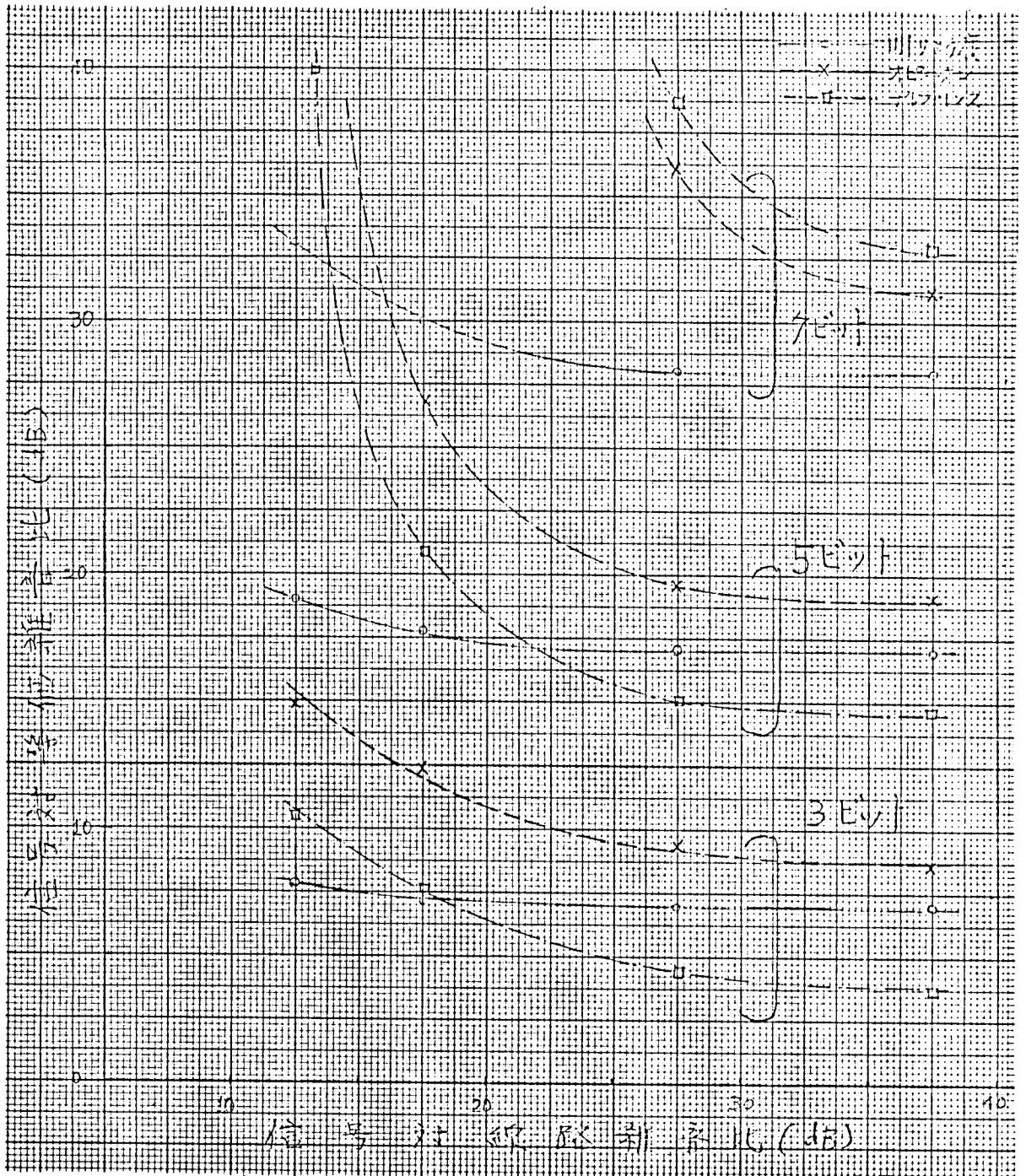


図7.4 線路雑音の影響

($\mu = 100$, 信号入力レベル -13 dB)

2尺度では 信号対雑音比が 30 ~ 35 dB 以下の全域で強く現れており、高ビットになる程明りよう度との差が顕著に現われる。

このような明りよう度と他の尺度との差は、明りよう度が音韻性に着目しているのに対し、他の 2 尺度では音色性に着目していること、すなわち情報の質に差のあることに起因するものと考えられる。これと同様な効果が視覚系においても認められ、画像品質の向上に利用されている⁽⁵⁾

7.8 尺度間の相互比較

本節では前節までに示した種々の測定結果を用いて、尺度相互間の関係の分析を試みる。ここでは相互関係を分析するための基準として明りょう度ととり、これと他の尺度との直接比較を行うことを試みた。

7.8.1 明りょう度とオピニオンとの比較

ビット数、信号入力レベル、圧伸率などを変えたときの信号対明りょう度等価雑音比 (X) と、信号対オピニオン等価雑音比 (Y) の関係を、前者を横軸に、後者を縦軸にとって図7.5 に示した。図7.5の結果から、圧伸率 $\mu=100$ 一定、信号入力レベルが -13 dB 一定で、かつビット数が 7, 5, 3 と変った場合の X と Y との関係は

$$Y = X + 2 \quad (7.1)$$

なる直線で表わされることがわかる。圧伸率 μ が 0 になると、7~4ビットの範囲では、近似的に

$$Y = 1.63X - 20.3 \quad (7.2)$$

なる直線で表わされるが、4ビット以下では X と Y との関係が (7.2) の直線に比して勾配のゆるやかな曲線となり、終端では水平方向に向う。次に入力レベルが -43 dB 一定、 μ がそれぞれ 50, 100, 150 で一定の場合、ビット数が変わると X と Y との関係は $\mu=0$ の曲線に極めて接近した3本の曲線となり、この曲線の直線部分は k および β が異なる

$$Y = kX + \beta \quad (7.3)$$

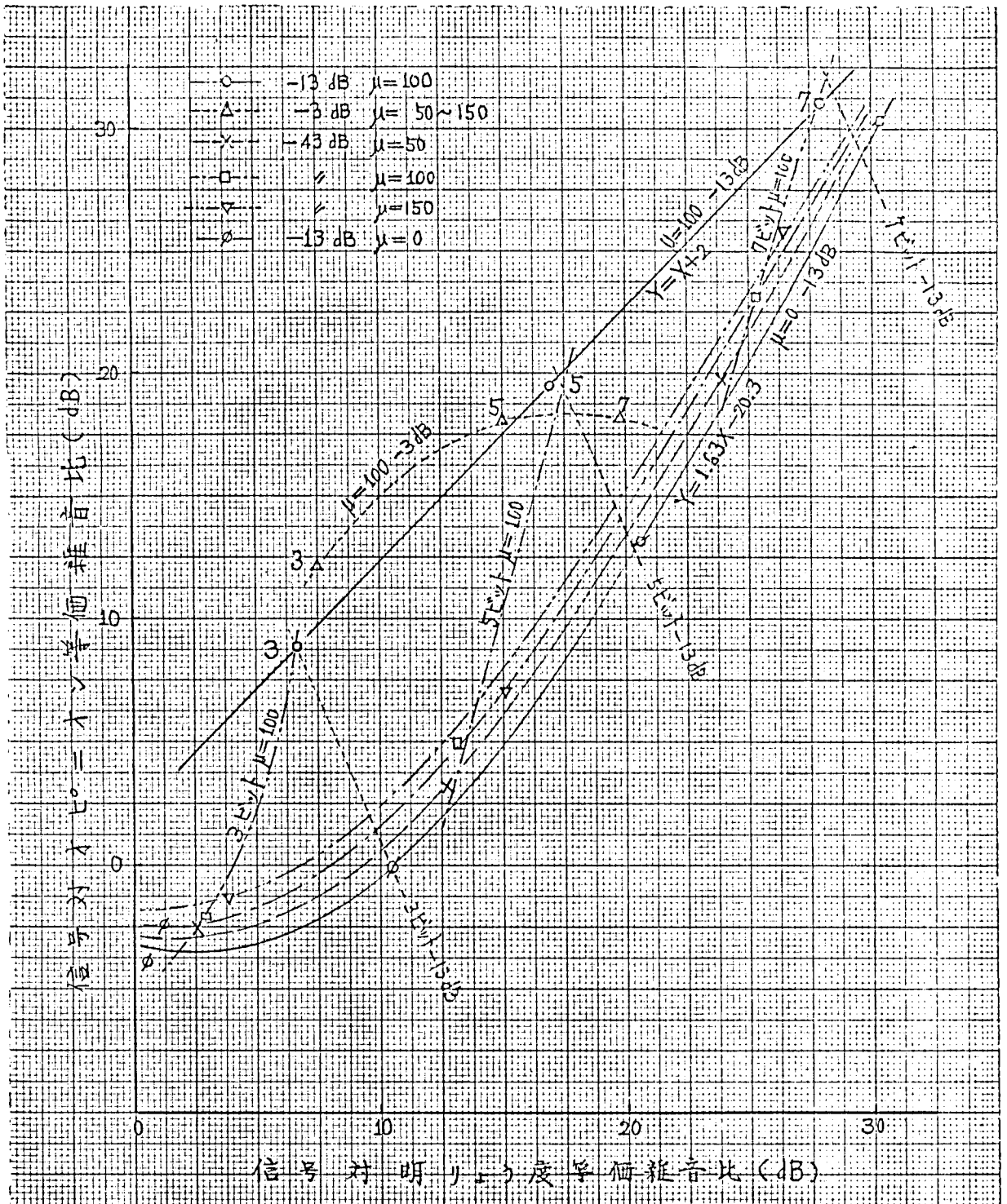


図 7.5 明りょう度等価雑音に対するオピニオン等価雑音

なる形の3本の直線で近似できる。従って(7.1)(7.2)を含めていろいろの信号入力レベルにおける X と Y の関係は、近似的に式(7.3)で表わられることになる。

7.8.2 明りょう度とプレファレンスの比較

信号対明りょう度等価雑音比と信号対プレファレンス等価雑音比の関係を、前者を横軸、後者を縦軸にとって図7.6に示す。図7.6から信号入力レベル -13 dB, $\mu=100$ の条件でビット数を変えた時の X と Y の関係を求めると

$$Y = 1.4 X - 7 \quad (7.4)$$

となり、図7.5の場合よりやや急峻な勾配となっている。信号入力レベルが -43 dBの場合には X と Y の関係は式(7.4)とほぼ平行な3本の直線で近似でき、 $\mu=150, 100, 50$ の順に直線が下方にほぼ等間隔で平行移動する。しかし平行移動の間隔は図7.5の場合より広くなっており、その分だけ信号入力レベル -13 dBの直線に接近している。このことから信号入力レベル -43 dBではプレファレンスによる評価は μ の低いほどオピニオンによる評価よりあまくなっていることがわかる。

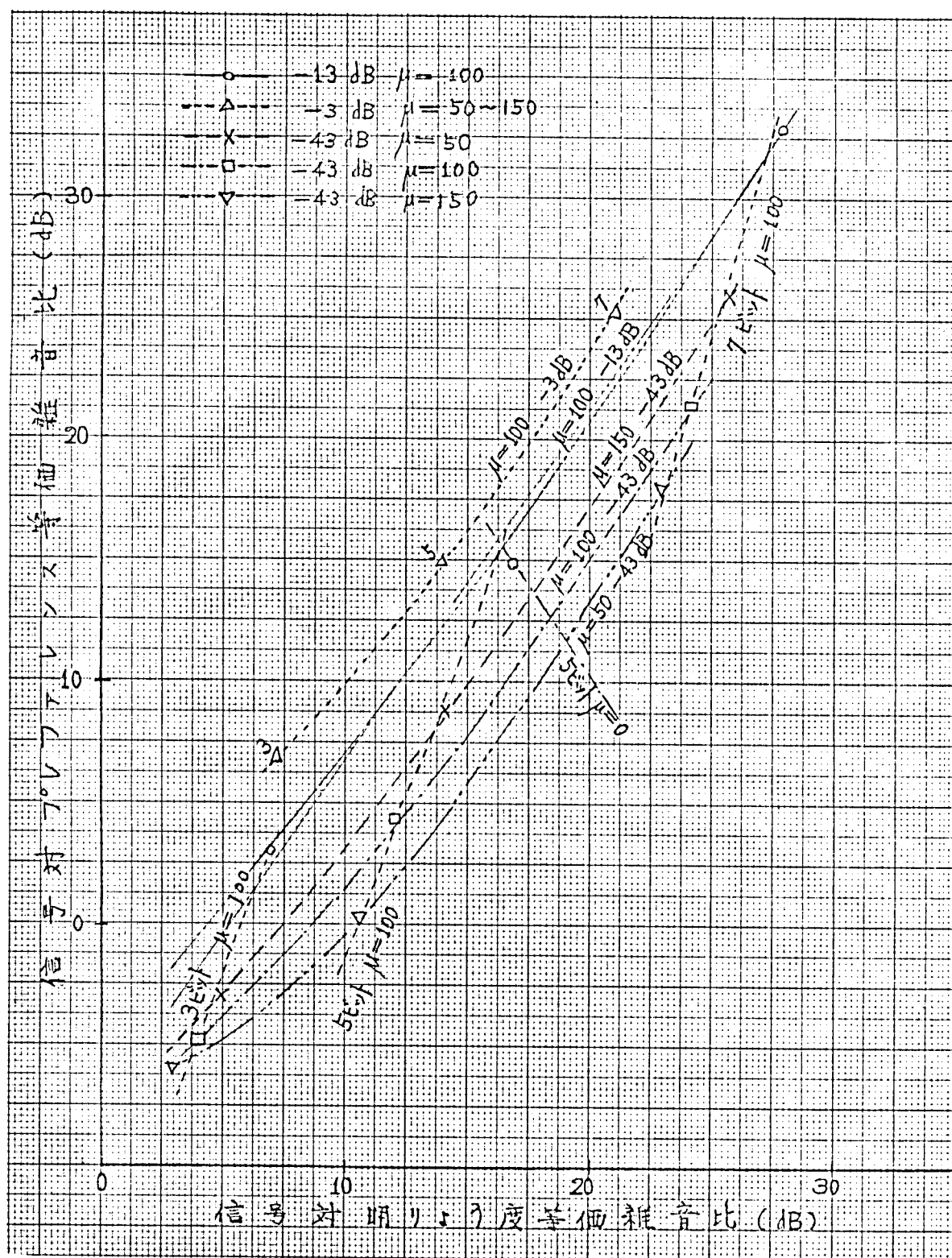


図7.6 明りょう度等価雑音に対するプレファレンス等価雑音

7.8.3 明りょう度と臨界雑音の比較

前項と同様に、信号対明りょう度等価雑音比と信号対臨界雑音比の関係を、前者を横軸に後者を縦軸にとって図7.7に示した。図7.7から信号入力レベル-13 dBの場合のXとYの関係を求めると

$$Y = 1.84X - 11 \quad (7.5)$$

となっており、7.8.2の式(7.4)の勾配より一層急な勾配となっている。信号入力レベルが-43 dBの場合はやはり-13 dBの場合より臨界雑音が劣化し圧伸率の低いほどほぼ等間隔で下方に位置するが、この程度はオピニオンおよびプレファレンスの場合に比較するとわずかであって、曲線は-13 dBの場合の式(7.5)に接近している。このことから信号入力レベル-43 dBでは臨界雑音による評価はオピニオンあるいはプレファレンスによる評価に比較してあまくなっていることがわかる。

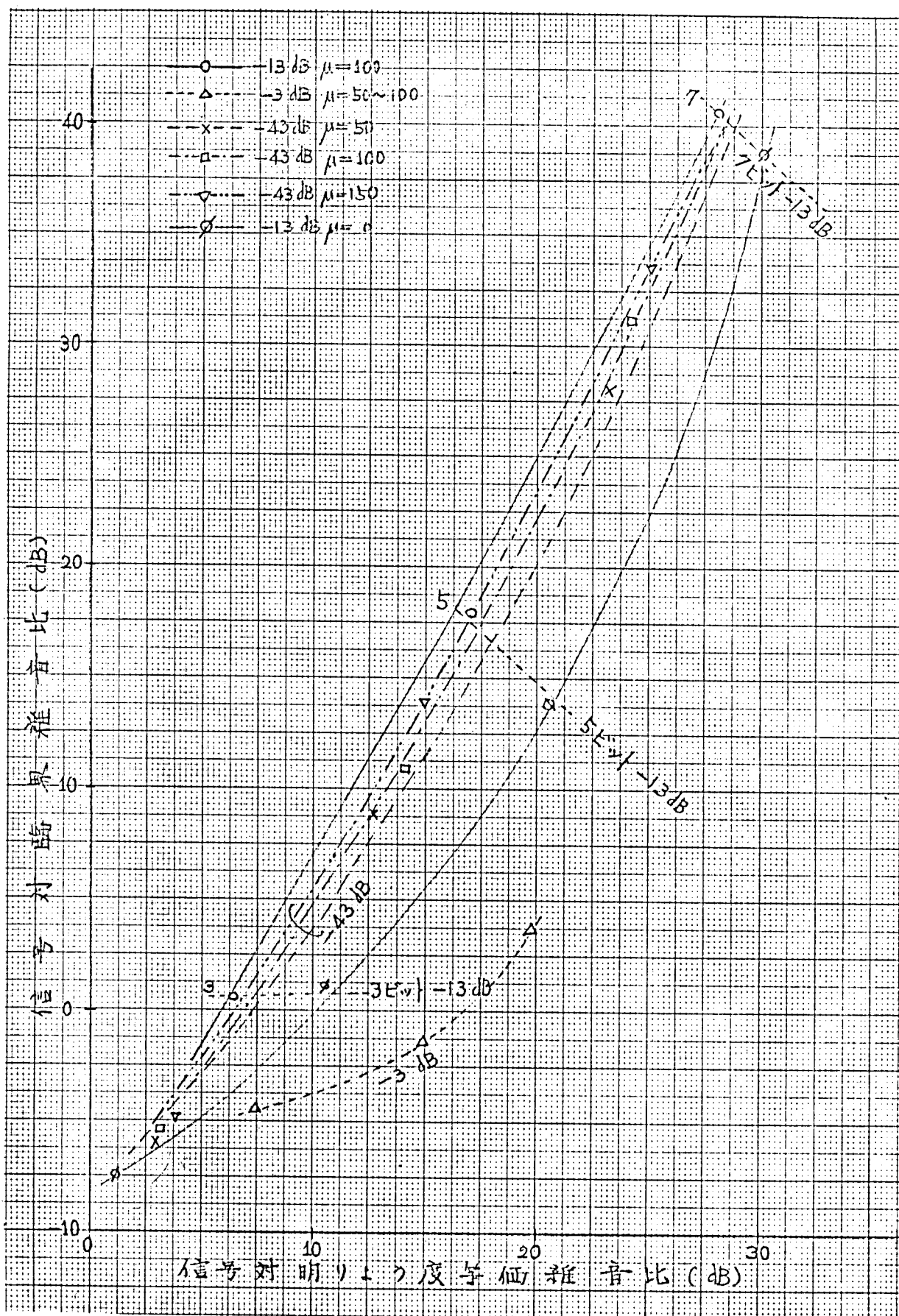


図 7.7 明りさう度等価雑音に対する臨界雑音

7.9 各尺度等価雑音の定量的表現

前節までに得られた結果から，信号対明りょう度等価雑音比 X と明りょう度以外の尺度の信号対等価雑音比 Y の関係は

$$Y = kX + \beta \quad (7.6)$$

なる直線の関係にあることがわかった。本節では Y として，オピニオン，プレファレンス，臨界雑音を用いた場合，それらの尺度について信号入力レベルや圧伸率の変わった場合の k, β の値を等価圧伸率のみの関数として一義的に表現し，いかなる PCM 系の伝送条件に対しても X から Y を予測することの出来る予測モデルを構成する。以下 7.9.1 で等価圧伸率の定義と計算法について，7.9.2 では等価圧伸率による信号対等価雑音比の正規化表現について，7.9.3 では各尺度等価雑音の予測モデルについて述べる。

7.9.1 等価圧伸率と等価ビット数

信号入力レベルが低下すると PCM 系における量子化段階のうち，低レベルの部分のみを使用することになり，等価的なビット数の低下を来すとともに圧伸器の圧伸率が実質的に低下することになる。たとえば図 7.8 に示すような圧伸特性において，入力レベルを最大レベル V より V' まで減少したとき，圧縮器の出力レベルは V'' となる。このような状態における圧伸特性を最大値 V の圧伸特性と比較するには，入力において V' を V 迄引き伸ばし，出力において V'' を V 迄引き伸ばして，元の圧伸特性との関係を調べればよいことになる。よって図 7.8 の実線と縦軸・横軸ともに最大値 V 迄引き伸ばし，さらに対数圧伸の関係式を考慮すると，新しい関係における圧伸率は等価的に

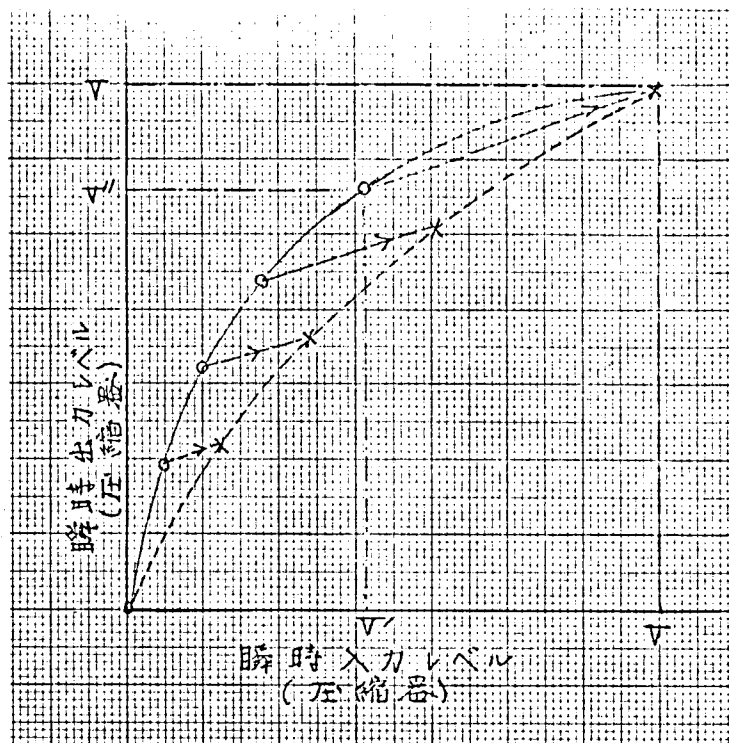


図 7.8 1信号入力レベルを変えたときの圧伸率の見かけの変化

$$\mu' = (V'/V) \mu \quad (7.7)$$

に変わっていることがわかる。このときの μ' を等価圧伸率と名づけ μ_e で表わすことにする。またこのときの等価的なビット数の減少値、すなわち元のビット数と等価ビット数との差は

$$\log_2 (V'/V) = \log_2 \{ \log_e (1 + \mu') / \log_e (1 + \mu) \} \quad (7.8)$$

となる。従ってこの関係を用いて等価ビット数 B_e が求められる。これを7ビットの場合について計算して示したのが図7.9であって、図7.9からたとえばビット数7、圧伸率 $\mu = 50, 100, 150$ の3種類のPCM系は信号入力レベルが -43dB に低下したとき、圧伸率がそれぞれ1.58, 3.16, 4.74、ビット数がそれぞれ4.9, 5.25, 5.45ビットのPCM系と等価になることがわかる。

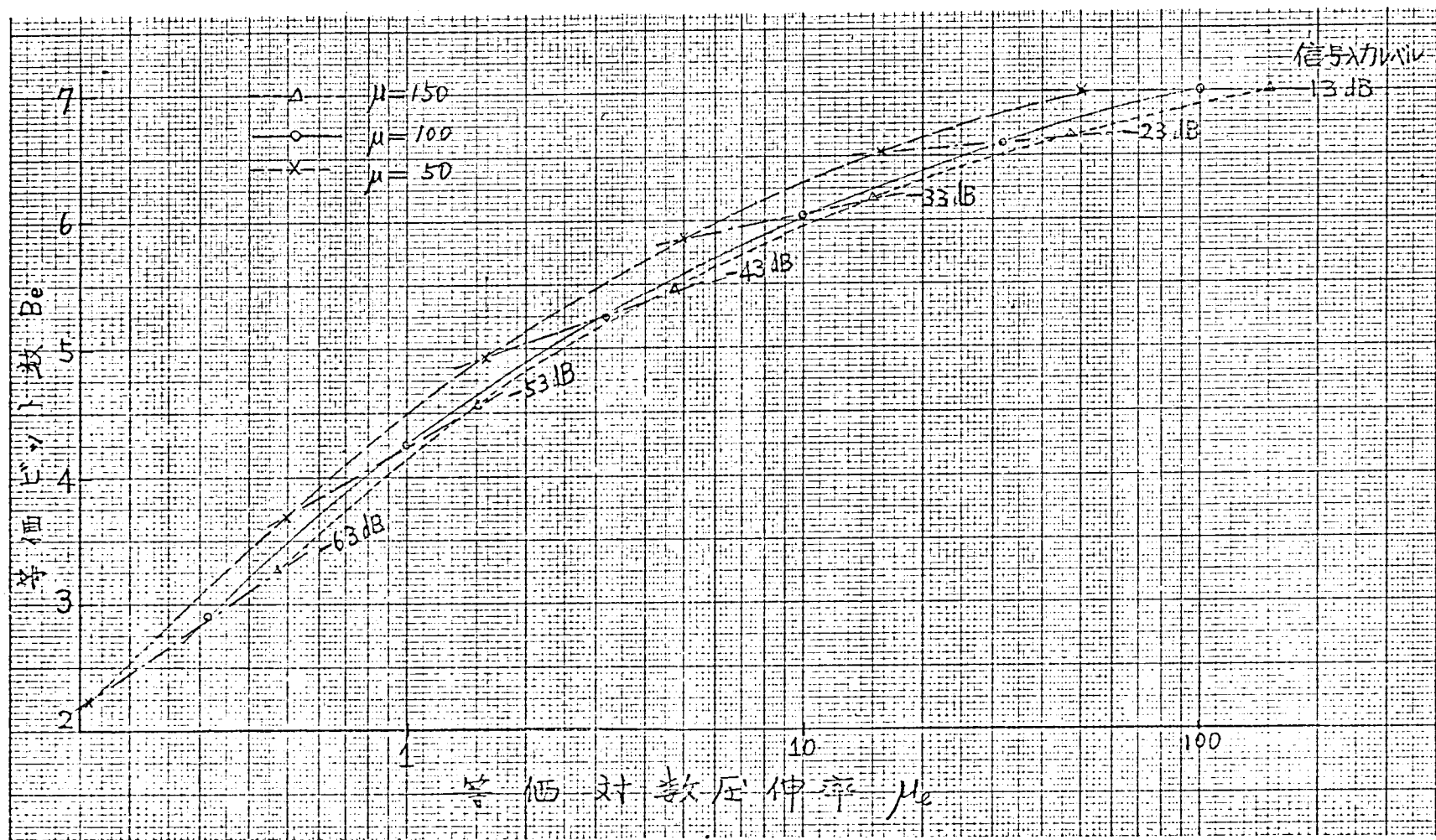


図7.9 信号入力レベルの変化に伴う等価圧伸率および等価ビット数の変化

7.9.2 信号対等価雑音比の正規化表現

7.8 節における各尺度の相互比較の結果から、信号対明りょう度等価雑音比 X と明りょう度以外の尺度の信号対等価雑音比 Y との間には式 (7.6) のような直線関係が成り立っている。本項では式 (7.6) における平行移動の関係を表わす定数 β を等価圧伸率 μ_e の関数として表現してみる。

定数 β は各尺度ごとに絶対値が異なるので、相対的な関係を明確にするために $\mu_e = 100$ に対する β の値を 100 (%), $\mu_e = 0$ に対する値を 0 (%) とし、中間の μ_e に対する β の値を % で表現することにする。このような β は μ_e に関して正規化された信号対等価雑音比であると考えられ、いまこれを記号 $R(\%)$ で表わすことにする。 μ_e と R の関係は各尺度によって異なり、図 7.5, 7.6, 7.7 から $i = 1, 2, 3$ に対応する三つの関数

$$R = R_i(\mu_e) \quad i = 1, 2, 3 \quad (7.9)$$

を誘導することができる。この関係を μ_e を横軸 (対数目盛), R を縦軸 (等間隔目盛) にとって図 7.10 に示す。

図 7.10 から各尺度とも μ_e が 10 以下の範囲で劣化が著しいことがわかるが、各尺度の劣化量の大きい量は横軸に沿ってほぼ等間隔に並んでおり、各尺度の相互関係はほぼ横軸方向への等間隔の平行移動の関係とみなし得ることがわかる。横軸の目盛りは対数目盛りであることに注意すれば、等間隔の平行移動の関係は同一の R の値を与える等価圧伸率 μ_e がほぼ等比数列の関係になっていることを示している。

$R = 50\%$ の前後で R_i の相互関係を求めると、

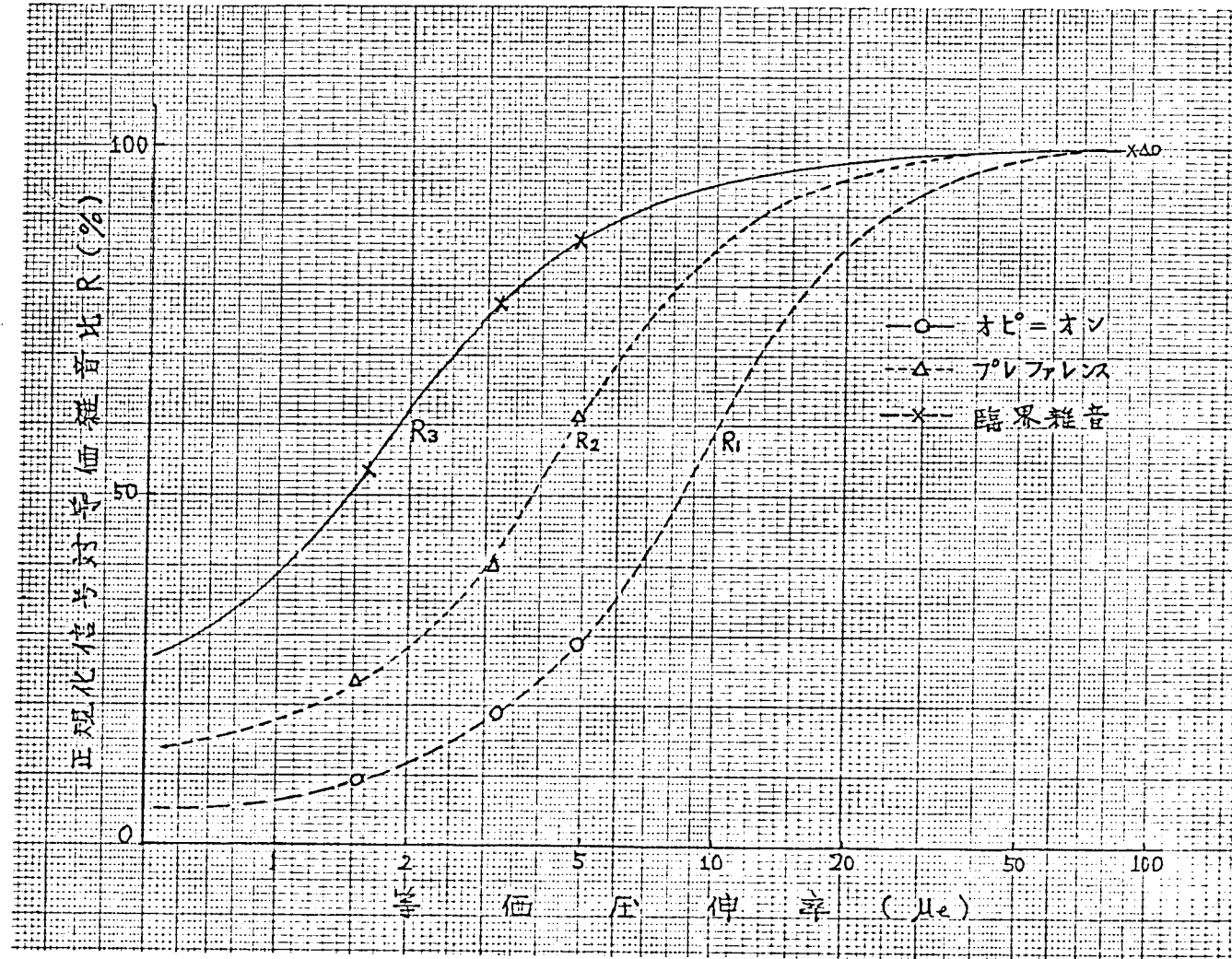


図 7.10 等価圧伸率に対する正規化信号対等価雑音比

$$\left. \begin{aligned} R_1(\mu_e) &= R_2(2.6\mu_e) \\ R_2(\mu_e) &= R_3(2.2\mu_e) \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

の関係となっており，これから等比数列の関係とみなした時の比例定数はほぼ 2.4 程度であることがわかる。正規化された信号対等価雑音比 R の各尺度による評価値が，このように等価圧伸率 μ_e による影響をかなり大幅に受けていることは，結局これらの尺度が着目している品質の情報構成要素ともいえるべき成分が音声の各レベルに沿って異った分布をなしていることを示唆しており，今後の実験にもとづいてこれらを定量化することも可能と考えられる。なお，ここで得られた結果は次の 7.9.3 において各尺度間の関係を定量的に表現する上において有効にもちこられる。

7.9.3 各尺度等価雑音の定量的表現

7.9.2 では式(7.6)の β を正規化し等価圧伸率の関数として表現したが，ここでは式(7.6)の k を等価圧伸率の関数として表現し，これらの結果をもちいて X から Y を求める一般的手続きについて述べる。

まず，図 7.5, 7.6, 7.7 を同一スケール上で比較すると， $\mu_e = 100$ の場合の三つの尺度による信号対等価雑音比 Y は $X = 20$ dB の奥でそれぞれ 22.7 dB, 20.4 dB, 25.0 dB となっており，これは各尺度の関係が最も接近しかつ等間隔となっている奥である。また $\mu_e = 0$ のときも $X = 20$ dB の奥で Y は 12.0, 11.0, 12.7 dB と接近した値となっている。ここではまず 20 dB の奥における Y の値を等価圧伸率 μ_e の関数として表現し，しかる後任意の X の値における Y の値を X および μ_e の関

数として表現することを考えてみよう。

まず、 $\mu_e = 100$, $X = 20$ (dB) の Y の値 22.7, 20.4, 25.0 は $i=1, 2, 3$ と
図7.5, 7.6, 7.7 に対する添字として

$$Y(100) = 22.7 + \varepsilon_i(100) \quad \text{ただし } \varepsilon_1(100)=0, \varepsilon_2(100)=-2.3, \varepsilon_3(100)=2.3 \dots (7.10)$$

の形で、また $\mu_e = 0$, $X = 20$ (dB) の Y の値 12.0, 11.0, 12.7 (dB) は

$$Y(0) = 12.0 + \varepsilon_i(0) \quad \text{ただし } \varepsilon_1(0)=0, \varepsilon_2(0)=-1.0, \varepsilon_3(0)=0.7 \dots (7.11)$$

の形で表現できる。

さて、7.9.2 における R の定義から R は $Y(100) - Y(0)$ に対する $Y - Y(0)$ の比
として表現でき

$$R_i = \frac{Y - Y(0)}{Y(100) - Y(0)} \times 100 = \frac{Y - Y(0)}{B_i} (\%) \quad (7.12)$$

$$B_i = \{Y(100) - Y(0)\} / 100$$

と表わされる。この式から式(7.11)を考慮して

$$Y = 12.0 + B_i R_i + \varepsilon_i(0) \quad (7.13)$$

が導かれる。式(7.13)は $X = 20$ (dB) に対する Y と μ_e との関係式であり、
 $X = 20$ (dB) 以外の任意の X に対しては、 $X - 20$ に各直線の勾配を乗じて式(7.13)の右辺1項と X の関数として表現することが必要である。このとき $X - 20$ に乗
ずべき勾配の値は μ_e の関数従って R の関数であってほしい

$$\left. \begin{aligned} A_1(R) &= 1.63 - 0.0063R \\ A_2(R) &= 1.49 - 0.0009R \\ A_3(R) &= 1.84 \end{aligned} \right\} \quad (7.14)$$

となる。ここでビット数について $A_1(R)$, $A_2(R)$ は5ビット以上7ビット迄の全範
囲に適用可能であるが、 $A_3(R)$ のみは5ビット前後のみに適合する値であって、

7ビット 近辺では

$$A_3'(R) = 1.84 + 0.0183R \quad (7.14)'$$

で近似した方がより高い精度が得られる。ただしこのとき $\varepsilon_3(0)$ の値としては

$$\varepsilon_3'(0) = -9.5 \quad (7.11)'$$

なる値を用いねばならない。式 (7.14), (7.14)' をグラフで表現すると図 7.11 を得る。結局一般に X と Y との関係は式 (7.9), (7.13), (7.14) より

$$Y = A_i(R_i) \cdot (X - 20) + B_i \cdot R_i + 12 + \varepsilon_i(0) \quad i = 1, 2, 3 \quad (7.15)$$

で表わされることになり、等価圧伸率 μ_e と信号対明りょう度等価雑音比 $X(\text{dB})$ が知られているとき 図 7.10 から $R_i(\mu_e)$ が求まり、これを用いて式 (7.15) から Y が計算出来ることになる。等価圧伸率は信号入力レベルと圧伸率から 7.9.1 の方法を用いて求めることが出来る、また信号対明りょう度等価雑音比はすでに得られた実験結果などから求めることが出来る。従って、PCM系における基本パラメータの任意の値に対しても、種々の尺度の等価雑音レベルを式 (7.15) を用いて近似的に予測することが可能となった。

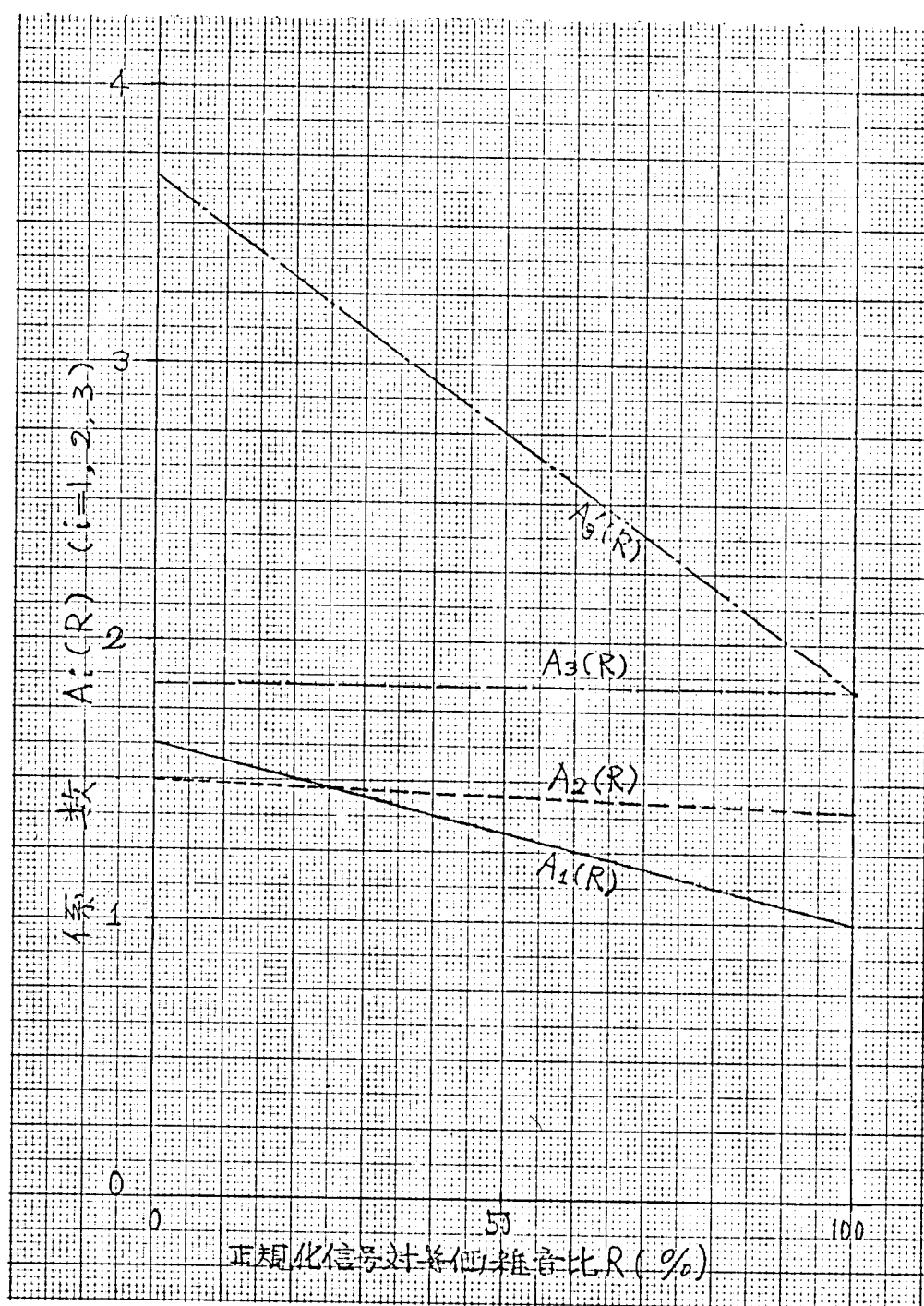


图 7.11 正規化信号対等価雑音比 R (%) に対する系数 $A_i(R)$

7.10 結論

以上四つの異なる尺度を用いて PCM系の 通話品質を測定し、その結果をいろいろの角度から検討した。まず 7.4 ~ 7.6 節に述べたように ビット数、信号入力レベル、圧伸率などの変化に対する各尺度の信号対等価雑音比の変化を調べたところ、これらパラメータの両極端の条件では、一般に各尺度の評価の順位が逆転する性質があることが知られた。この性質が最も端的に現れている ビット数の変化の場合を例にとると高ビットで品質がよい条件では、臨界雑音、プレファレンス、オピニオン、明りよう度の順にきびしさが増すのに対し、低ビットでは逆に明りよう度、オピニオン、プレファレンス、臨界雑音の順にきびしさが増しており、順序が逆転している。いかえれば明りよう度のようには高ビットで評価がきびしい尺度は低ビットで評価があまくなっており、逆に臨界雑音のように高ビットで評価があまい尺度は低ビットで評価がきびしくなっている。前者のような尺度、すなわちビット数の変化に対する信号対等価雑音比の変化の小さい尺度はビット数の変化に対する秤量単位が相対的にあらいと見え、後者のような尺度は秤量単位がこまかいと言える。しかし明りよう度のようにはビット数の変化に対する秤量単位が相対的にあらう尺度でも高ビットにおいては逆に最もきびしい尺度であって、僅かな変化でも劣化量として明確に検出することができるとに注意する必要がある。

一方 量子化しずみ電力との関係から各尺度の評価特性を概観すると、明りよう度等価雑音は量子化しずみ電力と 1次比例の関係があり、したがって量子化しずみ電力の客観的測定値をもちいて明りよう度等価雑音を決めることができる。

で取扱いが簡単であり，その意味で標準的尺度と考えられる．これに反し他の尺度は量子化ムずみ電力と1次比例の関係にない．

これらの性質はビット数をパラメータとし，横軸に信号対明りよう度等価雑音比 X を，縦軸に他の3尺度の中の任意の一つの尺度による信号対等価雑音比をとって比較することにより，7.8節でみたようにすべて近似的に

$$Y = kX + \beta$$

のような直線の関係となることがわかった．一方信号入力レベルや圧伸率の変化に対しては，7.9.1でみたように等価圧伸率の考えを用いてすべて信号入力レベル-13dBの条件に置き直すことができるので，PCM系の信号入力レベルや圧伸率の条件が決まると， k と β は等価圧伸率の一義的な関数として確定できることになり，結局これらの関係を組み合わせて信号対明りよう度等価雑音 X がわかったとき，他の尺度の信号対等価雑音比 Y をすべて単純な手続きによって予測することが可能となった．

この予測モデルにおいては β をその変化範囲で規格化し $R(\%)$ なる相対量で表現して Y の値の推定に用いている． R と μ_e との関係は各尺度によってまちまちであるが， R の劣化量の大きさ，奥に着目すると μ_e の小さい方から，臨界雑音，プレファレンス，およびオビエーションの順に並んでおり，同一の R の値を与える等価圧伸率 μ_e がほぼ等比数列の関係にあることが明らかにされた．しかしながらこの予測モデルの基礎となる聴覚のパラメータの特性については現在迄のところよくわかっていない．たゞこれらの現象はそれぞれの尺度が異った音声音色の別々の側面に着目し，しかもおのおのの音色の側面ごとにその構成要素が音声の瞬時

振幅によって異った荷重をもっていることによるものと考えられる。今後はこの予測モデルの基礎となる聴覚の基本パラメータの特性を明らかにし、このような特性に基づいて各尺度による予測法を統一的立場から構成することによって本質的な品質評価法の研究を進めることが必要である。

オ8章 電話伝送基準から見たPCM通信方式の通話品質

8.1 概論

本章では、すでにオ3章、オ4章などで明らかにしたPCM系の通話品質評価結果を、電話伝送基準の観点から論ずる。電話伝送基準は日本電信電話公社の商用電話伝送業務に関連しており、電話伝送基準に照して伝送系の伝送品質を明らかにすることは、実用上極めて重要な問題と考えられる。

以下本章では、8.2節で電話伝送基準について解説をよび、8.3節でPCM系の等価雑音と明りょう度等価減衰量(AEN)との関係を論じ、同時に電話伝送基準との関連を述べる。

8.2 電話伝送基準⁽¹⁾

日本電信電話公社では、その電話伝送業務に関し、利用者に迅速、明りょう、安定なサービスを提供するため、電話サービスの品質の良好さの度合いである電話品質に関連する基準を制定している。その基準は次の三つの基準から成る。すなわち上記の迅速性に対応する接続基準、明りょう性に対応する伝送基準、安定性に対応する安定基準である。この三つの基準のうち、音声に直接関係するのは伝送基準である。

電話伝送基準は伝送品質基準、設計基準、管理基準の三つから成っているが、この三つの中最も根幹となるものが伝送品質基準である。伝送品質基準を規定するための品質の尺度としては、オ1章、1.2節で述べた種々の尺度があるが、電話通話系設計の立場から見て、損失、伝送周波数、雑音などの伝送特性が与えられた時の品質の総合的評価が可能なこと、その尺度と文章了解度との対応が明確であることなどの理由からみてこれを伝送品質の尺度に用いることとなり、国際

通話系に関しては，CCITT の勧告にしたがい，通話当量を用いることに決定された。

このような立場から定められた電話伝送系の伝送品質に関して，「加入者の 90% に対して AEN 49 dB が確保されるべきである」ことが規定されている。この規定は，送話者の唇の前方 1m の自由音場における音圧レベルに換算して 62 dB の発声レベル（一般加入者の平均発声レベル 65 dB に比べて約 3 dB 低い）に対し，単音明りょう度 80% 以上と確保し，また一般加入者の 50% に対し文章了解度 100%，80% に対して文章了解度 90% を確保することが定められている。

電話伝送基準では，この品質基準にもとづいて，電話伝送系の伝送特性に对本次の規定が加えられている。

- (1) 加入者線路の損失は最大 7 dB とする。
- (2) 端局相互間の標準許容伝送損失は 17 dB とする。
- (3) 受話端局における回線雑音は，最繁時の平均評価雑音電圧で 1.1 mV とする。
- (4) 受話端局における局内雑音は最繁時の平均評価雑音で 0.6 mV とする。
- (5) 有効伝送周波帯域は，端局相互間で 350—3,200 Hz 以上であること。
- (6) 通話系を構成する各種回線区間の伝送損失の変動は標準偏差 1 dB とする。
- (7) 送受話器感度のバラツキの標準偏差はそれぞれ 1 dB とする。

などである。したがって，PCM 伝送系など新しい電話伝送系が実用化される際には，それがこの品質基準を完全に満たすものであるかどうかを検討されることになる。上記電話伝送基準は，昭和 40 年 10 月の制定になるものであるが，この伝送基準においては，経済性を比較的重視する立場に立っており，今後電話の普及がすすむにつれ種々の条件の変動などともかみ合せて，品質を重視した見方に立

つなど、この基準の改訂が行われることは十分あり得る。

8.3 明りょう度等価雑音と品質劣化量⁽²⁾⁽³⁾

AEN(明りょう度等価減衰量)は通常、単音明りょう度80%を与える線路損失を同じく単音明りょう度80%を与える直通系の線路損失と比較し、両者の差によって伝送系の伝送品質と表現する尺度である。

伝送品質を規定する通話品質尺度としては、前節で述べたように国内通話網ではすべてAENが用いられることが規定されている。本研究においては、今迄すべて等価雑音をもちいて品質を評価して来たので、PCM系の伝送品質を電話伝送基準の観点から取り扱うためには、等価雑音とAENとの関係を明らかにすることが必要となる。ここではPCM系を含む電話通話系の品質劣化量を表現するのに、PCM系を挿入しない直通電話系の品質を仮の基準と考え、この基準系と同一明りょう度を得るために必要な受聴レベルの増加分によって表現することとした。その際、比較の基準となる明りょう度値は単音明りょう度80%であって、かかる品質劣化量と等価雑音との関係は種々の等価雑音レベルについてすでに行った明りょう度試験の結果より誘導することができる。

等価雑音は本質的には直通系の雑音であって、SRAEN帯域濾波器により帯域制限されており、才2章に述べた商用電話系、ならびに標準電話系のそれぞれの系の差異にもかかわらず系に独立な一義的な値として定まった。品質劣化量も等価雑音と同様に商用電話系、標準系など種々の通話系に対してそれぞれの品質劣化量が定義されるが、その値は等価雑音の場合のような系に独立な一義的な値とはならず、それぞれの系によって異なったものとなる。ここでは等価雑音と品質劣化量の関係を次の三つの通話系について求めた。この通話系とは、才2章で述べた標準通話系(図2.4)および商用電話通話系(図2.5)と、さらに上記の電話伝送基準

で規定された限界通話系の3種の通話系である。前2者はすでにオ2章で説明した。限界通話系は伝送基準上許し得る最低限の通話品質を保つ電話通話系であって、その線路雑音は 1.1 mV 、局内雑音は 0.6 mV 、受話室内騒音レベルは60ホンとなっており、その他の限界通話系を規定する条件は前節の伝送特性で(1)から(7)にわたってしめした通りである。

各種通話系において、等価雑音レベルを変えて品質劣化量を実測した結果を図8.1に示す。図8.1では、横軸に信号対等価雑音比、縦軸に品質劣化量をとっている。

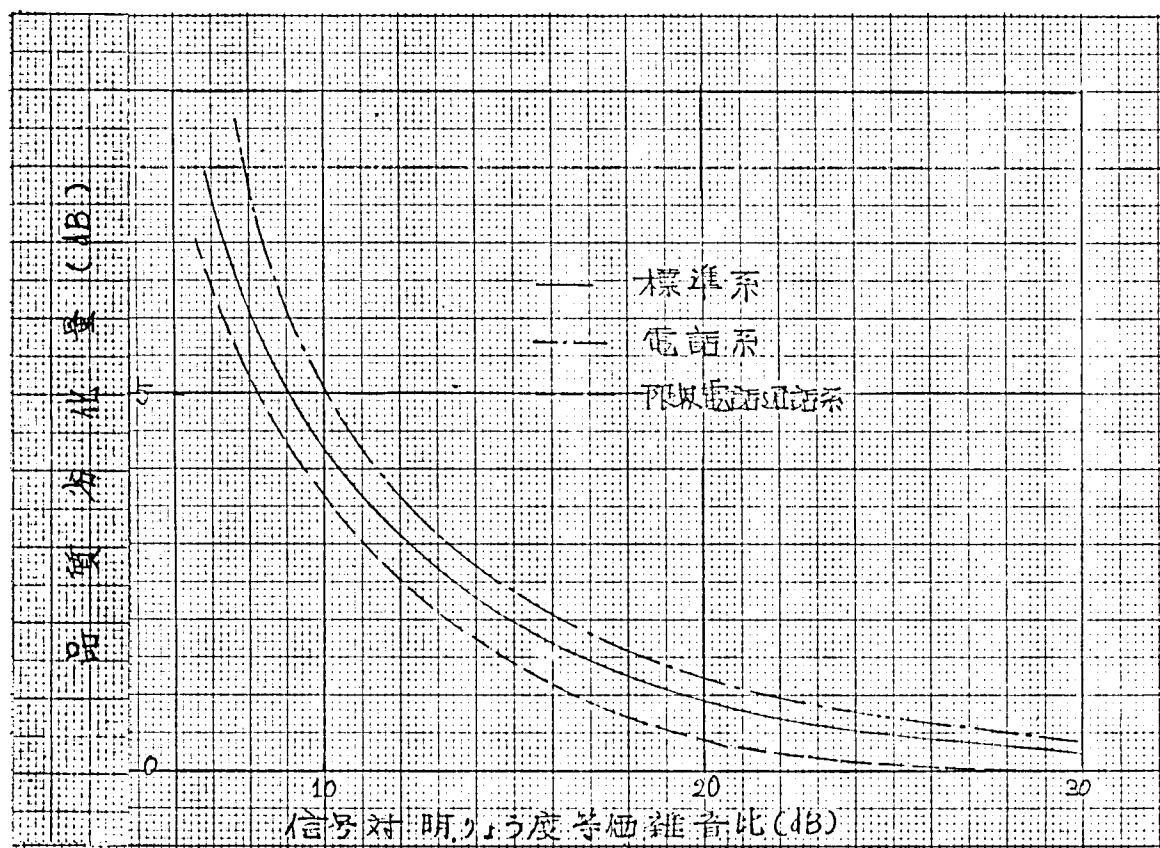


図8.1 信号対明りょう度 等価雑音に対する 品質劣化量

波形ひずみが等価レベル変化を含む場合には、総合の品質劣化量は上記の等価雑音に対する劣化量と等価レベル変化分の和として表わされる。その理由は、等価雑音と等価レベル変化の誘導について説明した第3章の図3.2 (b)などから明らかのように、等価レベル変化は等価雑音と品質劣化の関係とは独立であって、両者間には相乗効果が存在しないためである。したがって過負荷ひずみや誤整合の場合についても、図8.1を用い単純な手続きにより品質劣化量を求めることができる。

図8.1では、通常の電話系の劣化量が最も大きく、限界電話系が最も小さい。限界電話系では、線路雑音 1.1 mV があらかじめ加えられるので、新たに加わる雑音のみの影響は相対的に少く評価されることになり、このため三者の中では品質劣化量が最も少くなるものと考えられる。

商用のPCM系の条件では、信号対等価雑音比は約 28 dB 程度であって、この時には図8.1の結果によれば、いずれの通話系においても品質劣化量は 0.5 dB 以下となっている。特に限界通話系においては、この影響はほとんど完全に無視できる。しかしこれは単一リンクの結果であって、わが国の電話系では最大4リンクだが、また、単一リンクの信号対等価雑音比では、最低 23 dB 這がそれぞれ限界条件として考えられるので、このような限界条件における品質劣化量を考える必要がある。商用電話系における伝送基準では、すでに前節にのべたように、上の三条件の中、限界通話系が特に重要と考えられるので、以後この系についてPCM系の品質劣化量を考察する。

いま、限界電話通話系において、量子化ひずみが 26 dB (S/D比)のPCM系を4リンク接続した場合には、その等価雑音レベルは、これまでの結果からただちに 17 dB (S/N比)となることがわかり、図8.1からそれに対応する劣化量を読み

とることができる。この品質劣化量は約1 dBである。しかしPCM系のレベル変動は搬送電話系のそれに比してはるかに少ないので、レベル変動に関し見込まれていた品質劣化量がPCM系では大幅に減少することになる。この品質劣化量の改善は、前記の量子化ひずみにもとづく1 dBの品質劣化量を十分に相殺することが可能である。この検討から、S/N比が26 dB以上のPCM系の伝送品質は、最大4リンク連続してもその伝送品質は現行の電話伝送基準の規定を十分に満たすものと考えられる。

以上の検討は、等価雑音評価結果の応用の一例であって、ここで得られた等価雑音と品質劣化量の関係、および第3章、第4章などで得られた種々の条件下の等価雑音レベルの測定結果を用いることによって、いろいろなPCM系の伝送条件におけるPCM系の品質劣化量を算出することができる。

8.4 各種通話品質尺度による品質劣化量

すでに述べたように伝送基準の立場からは明りょう度による品質劣化量のみが重要であって、他の尺度による品質劣化量は、現在はまだ研究段階にある。しかし PCM系において音声信号に加わる波形ゆすみの影響は明りょう度のみでは十分明らかに出来ないとする立場から、オク章において種々の尺度による等価雑音を誘導して明りょう度等価雑音との比較を行った。ここでは引き続き明りょう度以外の種々の通話品質尺度による品質劣化量に関する実験および検討の結果を述べる。

8.4.1 オビオンによる品質劣化量

図8.2 (a) (b)に、標準系ならびに電話系のオビオン測定結果を示す。これは図2.4 および図2.5に示した試験回線によって、明りょう度と全く同一条件で測定を行ったものである。なお直通系において等価雑音の誘導のために挿入した雑音電圧値 1 mVは、S/N比に換算すると標準系の場合約 17.6 dB、電話系の場合約 15.6 dBとなる。また図の横軸は系利得ならびに線路損失、縦軸は平均オビオン値である。

図8.2 から次のような事実が知られる。すなわち図(a)の標準系では受聴レベルに対する品質劣化量の勾配がゆるく、受聴レベルと品質劣化とは、この図の範囲では、ほとんど独立とみなしてもよいと考えられるのに対し、図(b)では線路損失はただちに品質の劣化として現われている。したがって平均オビオン値に対する信号レベルの減衰の様子が標準系と電話系とでかなり異なったものになることが予想される。

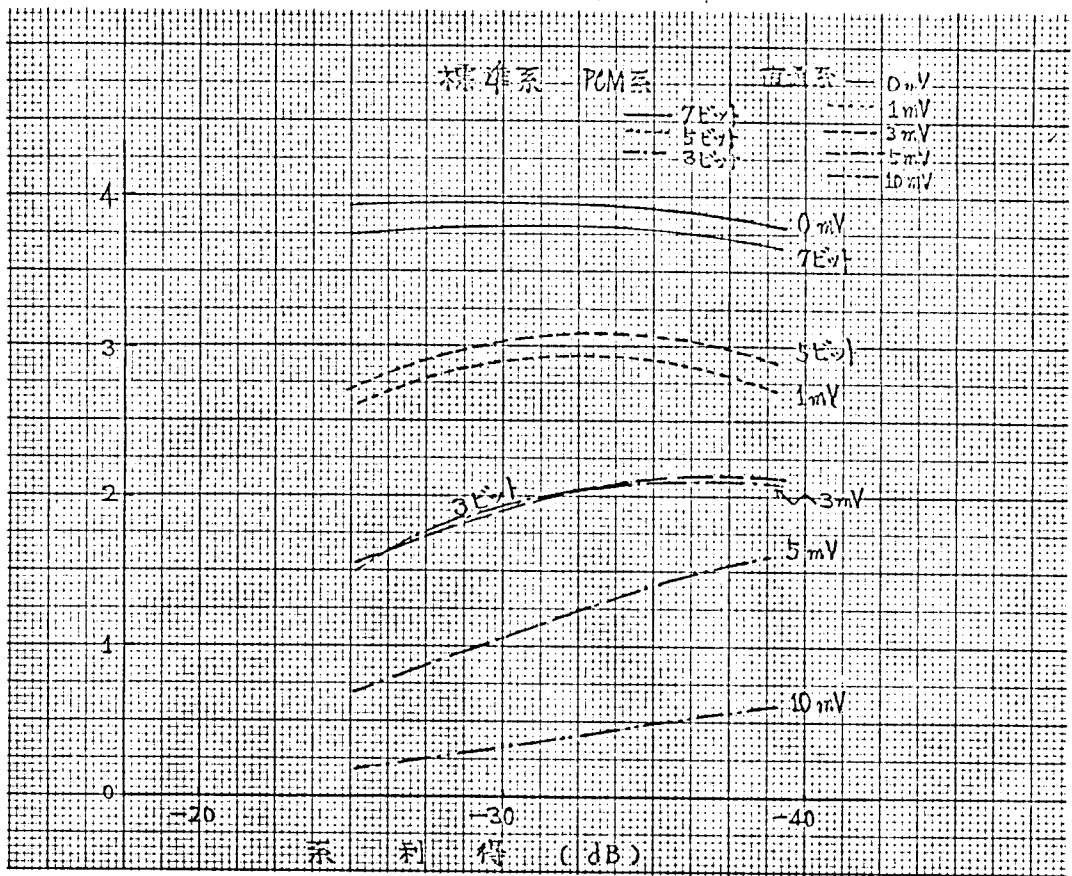


図 8.2 (a) 平均オビニオン値 (標準系)

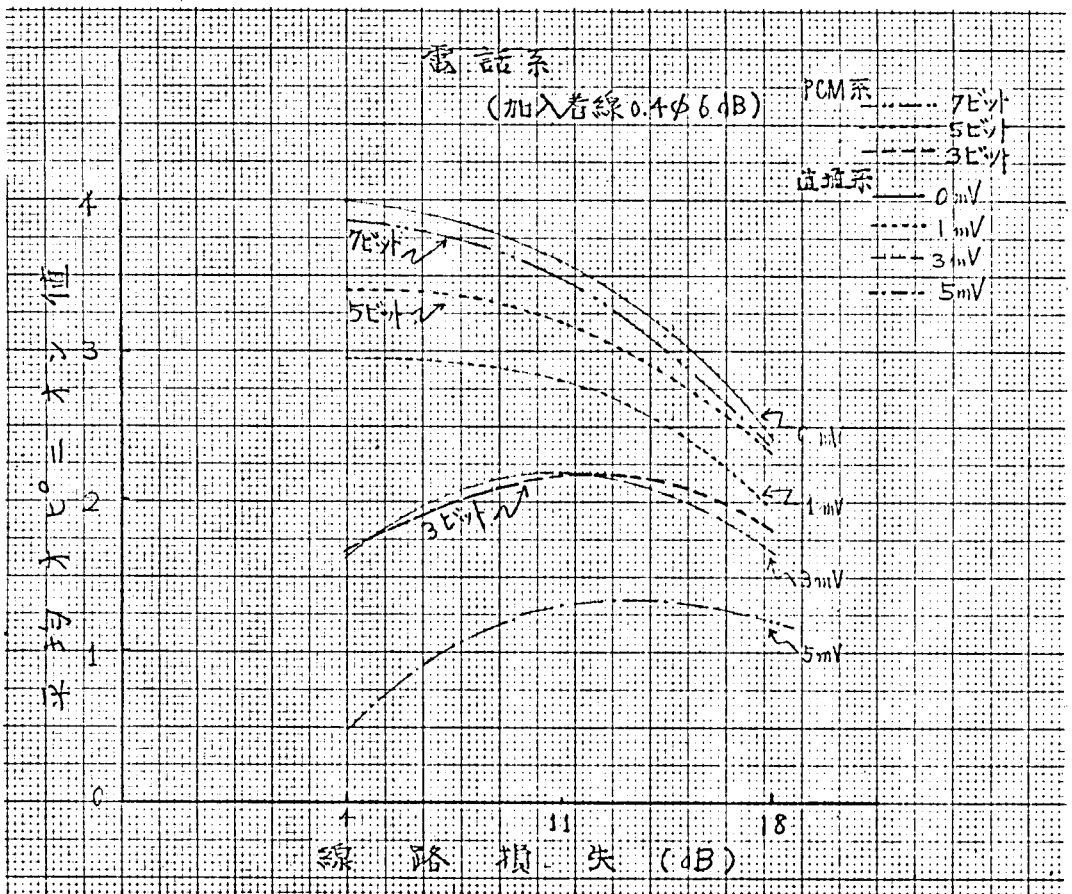


図 8.2 (b) 平均オビニオン値 (電話系)

ところで、AENすなわち明りょう度等価減衰量を求める際には、単音明りょう度80%に着目して求めるのであるが、オピニオンの場合にも、このような基準とどのように選ぶべきかが定まらなると品質劣化量が定まらない。オピニオンにおける基準のとり方に関しては次の二つの方法が考えられる。

- (i) 明りょう度80%を与えるPCM系の条件を基準にとる。従ってそのときのオピニオン値は実験ごとに異なったものとなる。
- (ii) 常にある一定の平均オピニオン値を基準にとる。通常この値は1.75とする。

これらの基準によるオピニオンの品質劣化量を、明りょう度を用いた品質劣化量

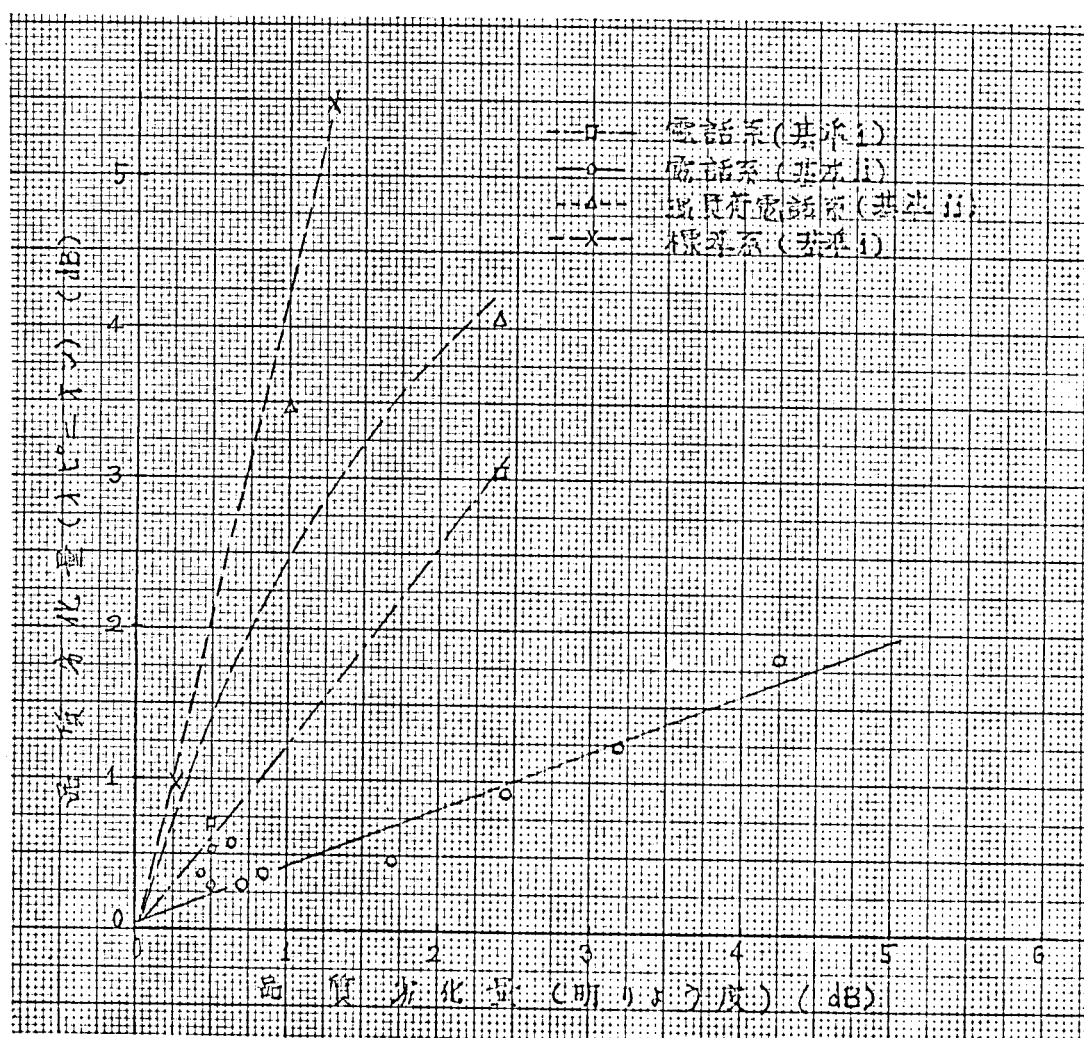


図 8.3 明りょう度による品質劣化量とオピニオンによる品質劣化量

と直接比較することを試み、その結果を図8.3に示す。

図8.3においては、横軸に図8.1において求めた明りょう度による品質劣化量と、縦軸にオピニオンによる品質劣化量をとっている。図8.3の結果からオピニオンによる電話系の品質劣化量は、基準(i)では明りょう度による品質劣化量の約1.3倍、基準(ii)では約0.4倍となっており、オピニオンによる評価は基準のとり方によってかなり変って来ることがわかる。しかし過負荷のすみについては基準(ii)でもきびしい評価を与えており、オピニオンの評価が基準のとり方のみならずひずみの種類によっても変って来ることを意味している。

標準系の場合には、図8.2(a)の範囲では基準(ii)を適用することが困難であるので、ここでは基準(i)のみの結果しか得られていない。この場合オピニオンの品質劣化量は明りょう度の品質劣化量の約3.6倍となっており、かなりきびしい評価結果となっている。基準(ii)による評価については、他の種々のオピニオン評価の結果から推定することは可能で、推定値については、電話系で得られた基準(ii)の結果とはほぼ同様な結果が得られている。

8.4.2 プレファレンスによる品質劣化量

オク章では，プレファレンスについて等価雑音による評価を行ったが，ここではプレファレンスについてPCM系の品質劣化を直接直通系のレベル減衰量に置き換えて評価した結果について述べる。

実験方法は，或る一定信号レベル L (dB) の PCM 系の音声を，それと同じ好ましさを持つ信号レベル L' (dB) の直通系の音声と比較し，品質劣化量 $L - L'$ を求めようとするもので， L' は多数の対比較実験結果から内挿的に求められる。ここでは信号レベル L としては，明りょう度 80 % の条件を選んだ。

図 8.4 はこの実験結果であって，横軸に明りょう度による品質劣化量，縦軸には上記の方法によるプレファレンス品質劣化量 $L - L'$ を dB 値で表現した。図 8.4 の結果ではプレファレンスによる品質劣化量は明りょう度による品質劣化量と比較して，電話系の場合には約 3.0 倍，標準系の場合には 0.93 倍となっている。一方，信号レベル L の決め方は，さきのオビニオンによる品質劣化量を決定する際の基準(i)のとり方と同様である。したがってここで得られたプレファレンスの結果をさきのオビニオンの結果と比較しようとするときには，オビニオンにおける基準(ii)の結果と比較するのが妥当と考えられる。電話系についてこのような比較を行った結果，プレファレンスによる品質劣化量はオビニオンによる品質劣化量の約 2.3 倍となっていることがわかる。

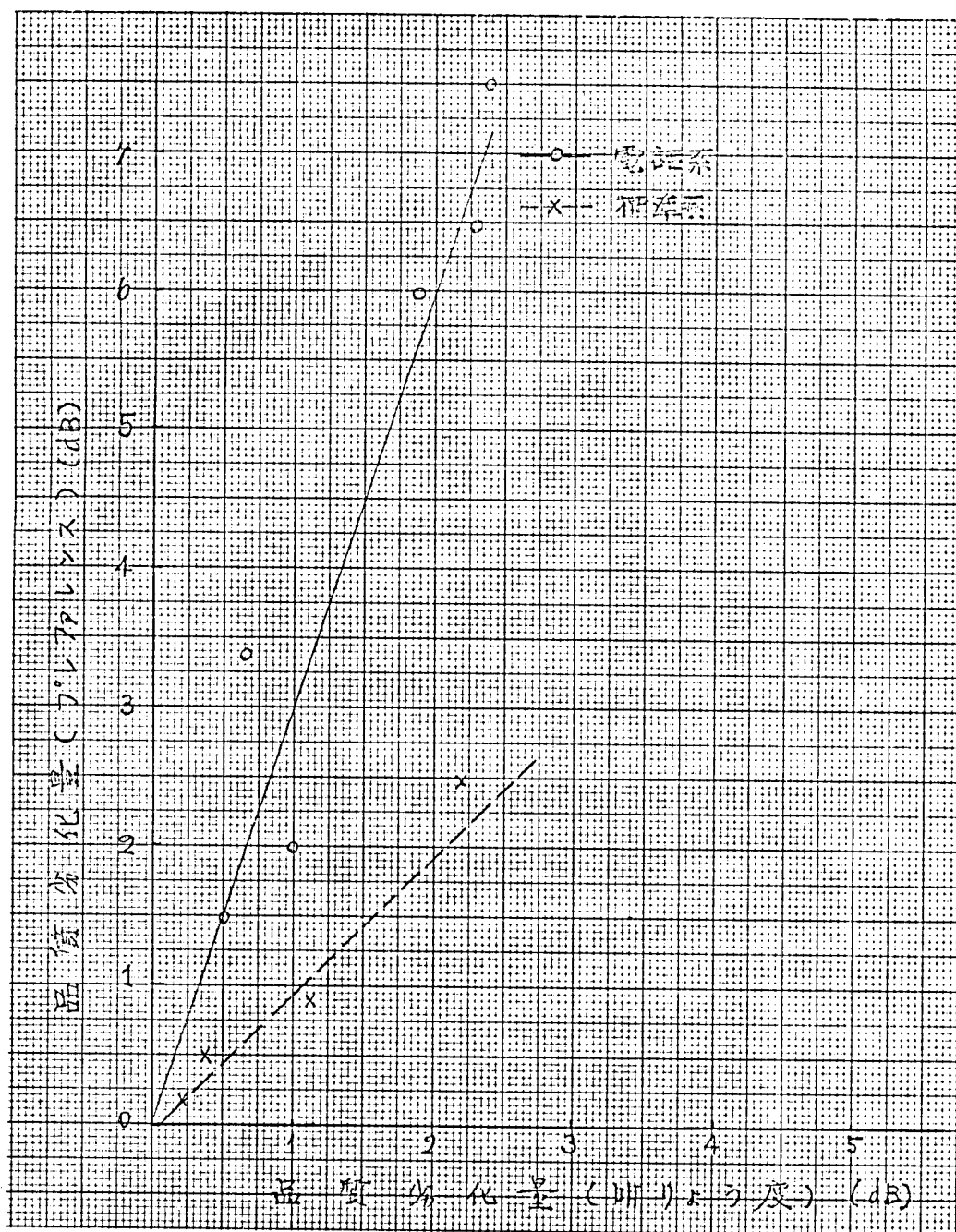


図8.4 明りよう度による品質劣化量と オビニオンによる品質劣化量の比較

8.4.3 明りょう度等価雑音と各種通話品質尺度による劣化量との関係

以上の諸実験から得られた種々の尺度の品質劣化量は、信号対明りょう度等価雑音比の関数として表示することが可能で、これにより図8.1に対応した各種尺度の品質劣化量の表現が得られる。ここでは電話系のみの結果に限った。この結果を図8.5に示す。

図8.5から、一般にオビ=オンおよびプレファレンスによる電話系の品質劣化量は明りょう度による品質劣化量よりも大きいことがわかり、明りょう度のみによる伝送品質の検討が品質のいろいろの側面を必ずしも十分に表わしていなかったことがわかる。

しかし、ここで得られた結果は実験条件のほんの一例に過ぎず、基準のとり方な

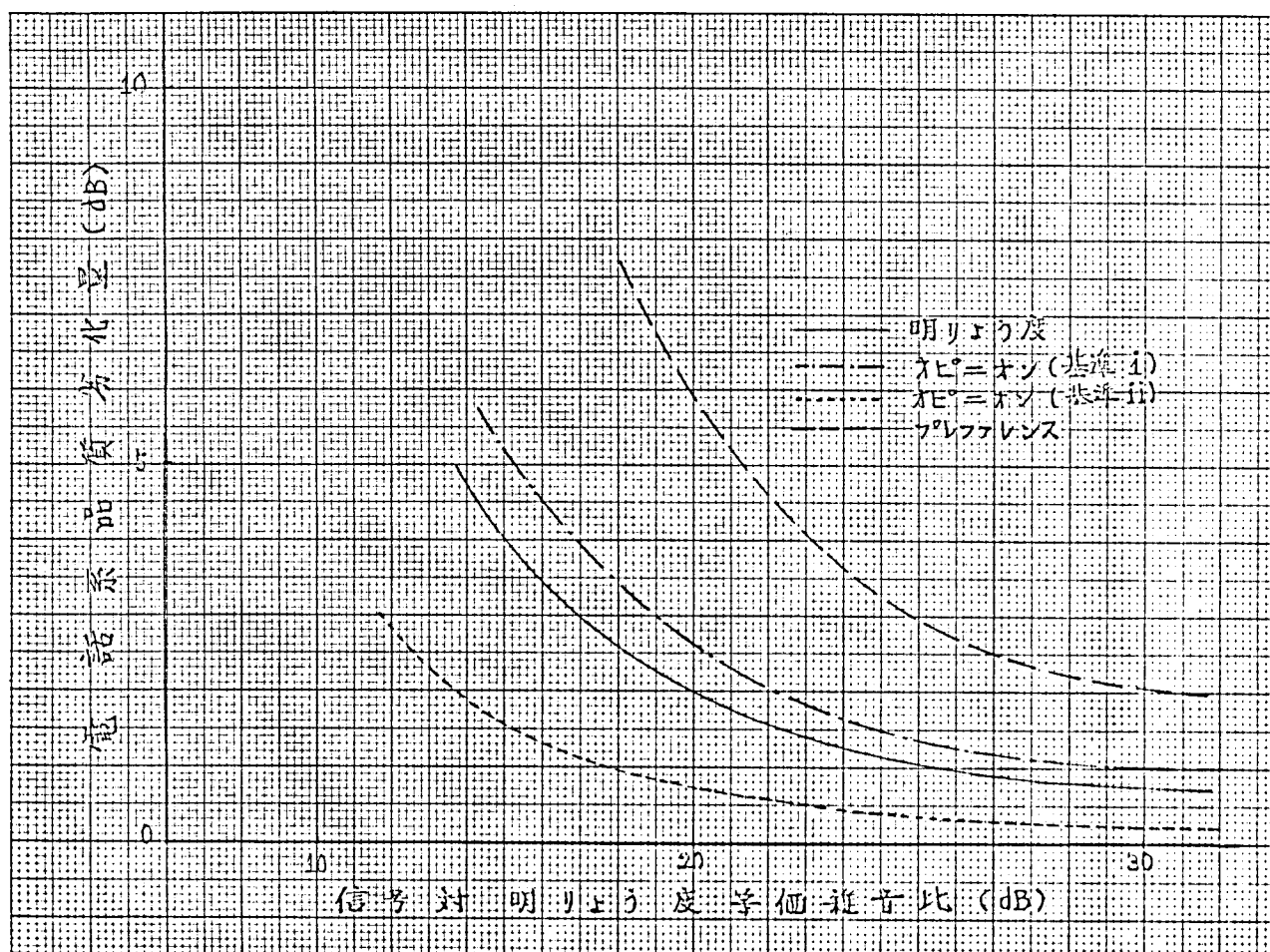


図8.5 信号対明りょう度等価雑音比に対する電話系品質劣化量

どに関して他にも幾つかの方法が考えられること、オピニオン・テストについては、標準系と電話系など実験条件の相違によってかなり結果が異なったものになることなど種々の解明されていない点を含んでいる。

これらは、今後なお多くの実験を行い、十分検討するべき問題である。

8.5 結論

以上、本章では、すでに第3章、第4章などで明らかにした等価雑音による評価結果を電話伝送基準の観点から論じ、電話伝送基準に照してPCM伝送系が十分良好な品質を保つ条件を求めるとともに、明りょう度以外の尺度による品質劣化については今後若干検討すべき点が残されていることを指摘した。

第9章 結論

通話品質の研究においては、伝送信号としての音声の構造を考慮しつつ、これに種々の伝送ゆずみや雑音を加え、その出力信号についての被験者の受聴応答にもとづいて考察を行うという方法が採られる。音声の基本的構成次元は、周波数、振幅および時間であるところから、これまで通話品質の対象となる伝送ゆずみとしてはこの種の次元に関係するものが主要な基本的ゆずみとして取扱われて来た。

音声の基本的構成次元の一つとして、まず伝送周波数帯域ゆずみが最も古くから取り上げられて来た。伝送帯域と明りょう度の関係については Fletcher の研究⁽¹⁾をはじめとする長い研究の歴史があり、日本語についても幾つかの研究がある⁽²⁾。さらに、明りょう度と物理的伝送条件との関係を確定して、これより逆に伝送条件のみから明りょう度を予測することと目的として提案された明りょう度指数⁽³⁾の概念は情報理論における仮定と類似の真があり、明りょう度指数を用いる明りょう度予測法によって、明りょう度値のかなり正確な予測が可能となって来た。しかし明りょう度指数による予測理論には周波数帯域間独立性の仮定が基本的仮定として含まれており、第1近似としてはこの仮定は成り立つが、複雑な伝送ゆずみの場合に正しい予測をしようとするとは必然的に帯域間の相関を仮定しなければならなくなる。この真についても日本語について幾つかの着実な研究の積み重ねが行われ、正しい予測が可能となって来た。⁽⁴⁾

音声の周波数構造の面からは、周波数帯域の伝送ゆずみとともに帯域雑音による妨害の問題があるが、明りょう度指数の概念では実効感覚レベルの考えが基本になっているので、周波数帯域を狭波帯で遮断すること、雑音で音声の周波数

成分を遮蔽することとも等価とみなされる。しかし実際には帯域雑音のマスクング効果のひろがりの影響を補正する必要があり、この点に関しては 2.3 の精密な研究が行われてきた。(5)(6)

ところで PCM 伝送系において音声信号に加わるひずみには、すでに 3 章、4 章で扱ったように幾つかの種類があるがすべて波形ひずみと考えられ、しかもその大部分は表 9.1 に示すように瞬時振幅の非直線ひずみから生起するものである。

従来この種の研究には Licklider による infinite peak clipping の研究⁽⁷⁾があり、音声に infinite peak clipping をほどにしても明りょう度が極めて高く保たれていることがわかった。この結果は、infinite peak clipping による波形ひずみの通話妨害量が、同一レベルの雑音の通話妨害量に比較してかなり小さいことを意味するもので、明りょう度指数による明りょう度値の予測法はそのまゝでは波形ひずみに適用出来ないことをしめしている。

PCM 系の波形ひずみがどのような物理的機構によって生起しているかを、表 9.1 の最右欄に簡単な非線形特性で示し、またこれに関連するパラメータも示した。表 9.1 によって 3 章、4 章で扱った PCM 系の各種要因と、各要因に対応する波形ひずみの種類が明確に把握される。

さて、上記のような非線形機構によって音声波形に付加される波形ひずみは、たとえばソナグラフなどの装置を用いて周波数スペクトルに分解することが出来る。図 9.1 はソナグラフによる量子化ひずみの分析結果であって、比較のため原音声ならびに雑音を加えた直通系の音声をも示した。直通系の雑音レベルは量子化ひずみ電力とほぼ等しいレベルのものを加えてある。この図において量子化ひずみと雑音との間にはかなり顕著な差が現われており、後者は時間的に定常であ



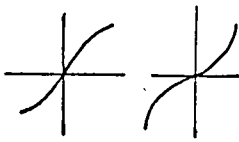
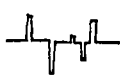



章	要因名	No	関連するパラメータ	波形いずみの種類	記号	波形いずみの生成機構
オ 3 章	基 本 パ ラ メ ー タ	①	量子化ビット数 信号入力レベル 対数圧伸率 μ	量子化いずみ	A	 階段特性
		②	標本化周波数	量子化いずみの折返し	A'	量子化いずみスペクトルの折返し
		③	信号入力レベル	過負荷いずみ	B	 飽和特性
		④	圧縮率 μ 伸長率 μ'	誤整合いずみ	C	 ゆるやかな 非線形特 性
オ 4 章	商 用 電 話 系 の 要 因	⑤	誤符号率	誤符号いずみ	D	 ランダム・パルス
		⑥	量子化パラメータ 線路雑音レベル	雑音と量子化いずみの複合いずみ	$N \oplus A$	$(\text{signal} + \text{noise}) +$ 
		⑦	信号入力レベル 線路雑音レベル	雑音と過負荷いずみの複合いずみ	$N \oplus B$	$(\text{signal} + \text{noise}) +$ 
		⑧	量子化パラメータ リンク接続数	多リンク量子化いずみ	$A \oplus A$ $(A \oplus A) \oplus A \dots$	 量子化いずみの重畳

表 9.1 オ3章, オ4章で扱った おもな 波形いずみの種類とその 関連パラメータの一覧表

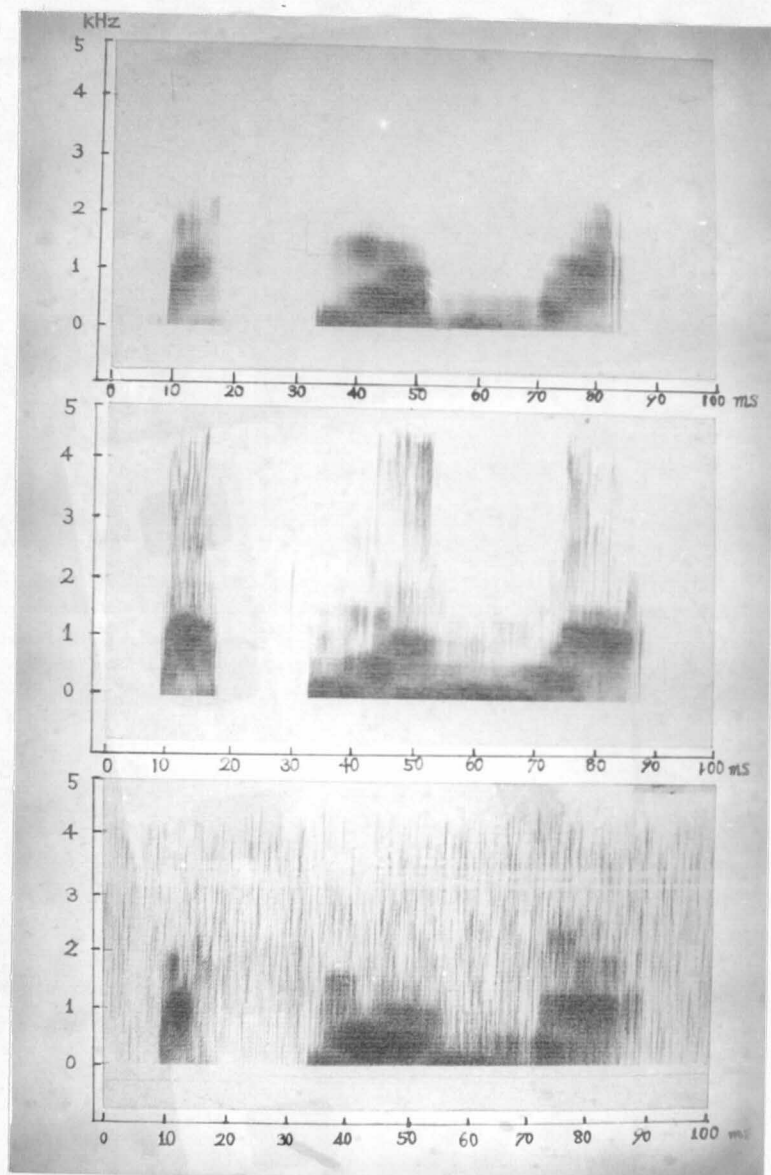


図9.1 量子化音声のソナグラム(女声, bakuonga)

(上) 原音 (中) PCM系(3ビット, $\mu=100$)

(下) 直通系 雑音3mV(信号対雑音比8dB)

て信号に独立であるのに対し前者は信号に複雑に関連した周波数・振幅のパターンを持っていることがみられる。

波形ゆずみの持つこのような「非定常性」と「信号との相関性」の二つの性質についてその波形ゆずみの種類との関係を表9.2にわかり易く表示した。表9.2では定常性のあるなしを S , \bar{S} で、信号独立性のあるなしを I , \bar{I} で表示し、 $S \cap I$, $\bar{S} \cap I$, $S \cap \bar{I}$, $\bar{S} \cap \bar{I}$ の4つのカテゴリに分け、この四つのカテゴリに属するゆずみを例示した。従来の明りょう度指数による解析的取扱いはオ1の $S \cap I$ のカテゴリに属する場合のみに限られており、他のカテゴリに属する波形ゆずみについては解析的取扱いが一般には不可能である。

しかし明りょう度指数の方法はもともと明りょう度測定結果と伝送条件との関係を明確にすることから始まったものであり、波形ゆずみの通話品質に対する解

No.	ゆずみの性質	各性質をもつ雑音・ゆずみの例	明りょう度指数による 解析的扱い
	S ; 定常性 I ; 信号との独立性		
1	$S \cap I$	白雑音, 帯域雑音, ホス雑音	○
2	$\bar{S} \cap I$	漏話, 誤符号ゆずみ	×
3	$S \cap \bar{I}$	雑音のある回線の高ビット均等量子化ゆずみ, 高ビット多リンク量子化ゆずみ	×
4	$\bar{S} \cap \bar{I}$	通常の量子化ゆずみ, 過負荷ゆずみ, 誤整合ゆずみ	×

表9.2 ゆずみの性質ならびに種類の分類表

析的取扱いを確立するためには実験結果を正確に求め、波形ひずみの定量的表現との関係を明確にすることがその本質となるものと考えられる。

本研究でおこなった明りょう度測定結果はたとえば図3.3, 図3.4で見られるように通話系の相違によって異なったものとなっており、従って明りょう度80%の点で誘導される品質劣化量の表現を上記の解析的研究の目的に用いることは必ずしも適切でない。本研究では第3章に定義した等価雑音の考え方を採用することにより通話系の相違による影響を受けず、しかも個々のひずみに対してかなり一義性をもつ測定結果を得ることができた。

この結果をたとえば量子化ひずみ電力(Aと略記)とそれに対応する明りょう度等価雑音電力(Bと略記)に例をとれば両者の間にはほぼ

$$B = A + 3 \quad (\text{dB})$$

の関係が成り立っており、量子化ひずみに関してはこの関係は一義的である。PCM系の波形ひずみは多くの場合量子化ひずみがそのほとんど主要な部分を構成しており、したがってPCM系の通話品質の明りょう度による評価結果において、上記の関係式の持つ実用的な意味は重要である。

PCM通話系においては、この他にも表9.1に掲げたように過負荷状態における過負荷ひずみ、誤整合状態における誤整合ひずみ、誤符号状態におけるパルス性のひずみなどが音声信号に加わることがあるが、これらについては等価雑音誘導時の状況が上記の量子化ひずみのみの場合と少々異っている。すなわち、これらのひずみでは多くの場合、ひずみ成分の中に信号レベルを等価的に変化せしめるような効果が含まれており、等価雑音とともにこのような効果の定量的評価が必要となる。この研究においては、明りょう度試験の結果に3.3節で述べた考察を加えることにより、

このようなレベル変化分を明りょう度試験の結果から誘導し得ることを示し、またこの誘導値が波形ひずみを加えられた音声波形 $g(t)$ から式(3.23)

$$D(a) = \overline{[g(t) - a \cdot f(t)]^2}$$

を最小ならしめる a の値として計算された推定値とかなりよく一致することを示した。しかし式(3.23)による推定値はひずみの量が多くなると実験値と一致せず、実験値よりも小さい方向にずれる傾向がある。一方このような a の値に対する $D(a)$ は波形ひずみの真のひずみ電力と考えられるが、計算結果によればこの値は等価雑音電力より 10 dB 以上も大きいことがわかった(図3.10参照)。この事実を上記のレベル変化量の予測値のずれと合わせ考えるならば、上記のような簡単なモデルのみからは実験事実を説明することが難しいことを意味しており、もっと精密な補正を行うことが必要となる。この場合、等価雑音の予測値が実験値とたとえ一致する場合があり得たとしても、このような予測は統計的な立場からのみ意味をもち、個々の音韻の受話識別などの詳細を予測することはできない。個々の音声の識別過程を音声のホルマント情報のひずみとしてモデル化し、これを百音節に押し進めてゆくことにより上記のような諸事実を説明するような試みは将来に残された興味ある問題である。

引き続きオ5章では PCM 系の各種波形ひずみの長時間スペクトルを考慮した場合、明りょう度値の予測をどの程度迄正しく行い得るかの計算により明らかにしようと試みた。この結果、過負荷ひずみについてはある程度まで予測値を実験値に近づけることに成功したが、差はまだ 8 dB もあり、結局波形ひずみのスペクトルを考慮することによっても確度の高い予測はできなかった。今後は個々の音韻に対する識別機構を音声のホルマント情報を考慮することなどからモデル化しこれを

予測の出発点とするか、或いは音声信号とひずみとの相互相関係数(常に負となる
ことが計算結果から確かめられている)を考慮することなど、何らかの新しい方
法に立脚しなければならないであろう。

第6章はこのような新しい予測法に関連して、何々の音韻に対する識別率を明
らかにしようとしたものであって、PCM系の波形ひずみによって母音のそれぞ
れにどのような異聴が生じているか、また子音の識別過程にどのような異聴が生
じているかを、異聴表に信号検出モデルを適用して定量的に表現することと試み
た。理論の性質上、異聴現象への信号検出モデルの適用にはかなり重大な仮定が
含まれたが、異聴の表現法としては有効であると考えられる。母音についてはそ
の混同度とフォルマント構造とを対比させることにより、量子化ひずみによるフォル
マント成分の崩壊の程度を知ることができた。子音については無声子音における
一定の時間構造が量子化ひずみによって劣化しないが、有声部分の周波数構
造は量子化ひずみによる劣化が大きいことがわかった。

結局、このような異聴表と信号検出理論を用いた異聴解析において、もしそれ
が本研究の段階に止まるならば、統計的なパラメータとの関連は必ずしも明確に
されたとは言えず、また一方何々の音韻の特性の完全な記述にまでは至っていな
い。が、韻音方法を同じくする音韻グループについてはその特性をかなり明確にす
ることができたといえよう。この識別過程は明りょう度試験において試験音節の
構成の変化による明りょう度値の変動の予測に有効に用いられるし、明りょう度
指数の普遍化のための基礎資料に、あるいはまた音韻の機械的識別の手掛りを与
えるなどの面に役に立つと思われる。

さて明りょう度は通話系の品質尺度としてもっとも合目的でしかも定量法のもっとも明確な尺度であるところから、従来通話品質における主たる尺度として用いられて来た。しかしPCM通信方式において音声信号に加わる波形ひずみには、表2.1に示したように従来の搬送電話系には見られな、新しいものが含まれており、明りょう度による評価のみで常に十分であるかどうかは疑わしい。第7章では、明りょう度以外の尺度として、音色に着目したオピニオンおよびプレファレンスおよび付加雑音の検知限に着目した臨界雑音の三つの尺度をもちい、これらの評価結果を明りょう度の結果と比較することを試みた。第7章ではこれらの尺度による評価結果はすべて等価雑音レベルの形で比較されているが、これらの結果は第8章における品質劣化量による表現と比較して整然としてより統一的な評価結果にまとめられたといえよう。

明りょう度も含めてこれらの尺度の評価結果と比較すると、商品質の條件と低品質の條件とでこれらの四つの尺度による評価の相対的な順位が入れかわることがこれらの尺度の相互関係におけるいちづるし、特徴として観察された。また明りょう度がひずみ電力と1次比例の関係にあるのに対し、他の3尺度はこのような関係はなく、ひずみ電力に対し高次の比例関係にあることがわかった。

次に他の3尺度のそれぞれの等価雑音について、明りょう度等価雑音との直接比較を試みたが、この比較結果は等価圧伸率を導入することによりかなり整った形に表現することができ、この結果明りょう度等価雑音レベルから他の尺度の等価雑音レベルと導く簡単な計算式を誘導した。しかしこの計算式を用いる等価雑音の予測法では、明りょう度指数の理論のような基本となる仮定がはっきりしてゐないので、将来これを裏づける聴覚的なモデルを見出すことが必要と思われる。

最後に第8章では、電話伝送基準の立場から通話品質劣化量をすべて信号レベルの減衰分に換算して評価することを試みた。

まず明りょう度等価雑音が知られたときの明りょう度上の品質劣化量(AEN増加分)を等価雑音レベルの関数として表示することを試み、両者の関係を実験によって求めたが、この関係は通話系の種類によって若干異なったものとなることが明らかとなった。信号対量子化ひずみ比が知られたときの信号対等価雑音比は第3章の結果などから簡単に求まるから、各種通話系の品質劣化量はこゝで得られた関係によってただちに求めることが出来る。

こゝではこの結果を電話伝送基準で規定される限界通話系に適用し、電話伝送基準をみたす限界条件について検討した。この結果は電話伝送基準上極めて重要な結果であって、これについては伝送業務上の公式の検討がなされた。

一方、明りょう度以外の通話品質尺度についても実験結果から品質劣化量を誘導することを試みたが、誘導法に関する基準が確定されていず、基準のとりかたによって品質劣化量にかなりの違いが見られたため、明りょう度以外の品質尺度について一定の確定的な結論を導くことはできなかつた。もともと PCM系に加わる波形ひずみには、レベル変化分と雑音等価成分があり、雑音等価成分を種々の条件のもとでそれと異質な品質劣化量に対応させようとするときは、被験者、実験規模、実験条件など種々の要因の影響を受けやすく、不安定になり易いと考えられる。これに対して、雑音等価成分とそれと類似の帯域雑音と対比させようとするときは被験者の評価に無理が生ぜず、種々の要因の影響を受け難いものと考えられる。この意味で PCM系の波形ひずみをまずレベル変化分と雑音等価分に分離し前者を等価レベル変化で、後者を等価雑音レベルで表現することは、結果の本質を

明確にする上で有効な表現方法であったと考えられる。

今後、通話品質の問題に関し未解決のまゝに残されている幾つかの問題に際して本研究が何かの貢献をなすことができれば幸いである。

この研究は筆者が日本電信電話公社電気通信研究所に在任中に行われたものであつて、同研究所の早坂前所長、小口前基礎研究部長(現企画室長)、伊藤宅内研究部長、熊谷伝送研究部長、斎藤基礎研究部長をはじめとして多くの方々の御指導と御援助を受けた。特に斎藤室長は直接この研究の指導に当られ、全般ならびに細部にわたつて多くの指示を賜つた。また同研究所の西村綱子、大村清一の諸氏から数値計算に関して御協力を頂き、口広雄嗣、前田英治、足達尚明の諸氏からも多くの御協力を頂いた。また本研究のかなりな量に上る通話品質測定作業はほとんどすべて同研究所の通話クルーの諸氏に担当して頂いたものである。また本論文をまとめるに当り京都大学の坂井教授から多くの適切な御指導を頂いた。

この研究はこれらの諸氏の御指導御協力のたまものであり、これらの諸氏に対して厚く感謝するとともに最大の敬意を捧げる。

文 献

第1章

- (1) Feldman ; A 96-channel Pulse Code Modulation System, Bell Lab. Rec., 26.9, p. 364 Sept. 1948
- (2) B. M. Oliver, J. R. Pierce, C. E. Shannon ; The Philosophy of PCM, Proc. I. R. E., 36, p. 1324 Nov. 1949
- (3) C. G. Davis ; An Experimental Pulse Code Modulation System for Short-Haul Trunks, B. S. T. J., 41 No. 1, P. 1, 1962
- (4) 熊谷他 ; 近距離 24 通話路 PCM 方式, 電気通信研究所研究発表会論文集
第12号 1965年10月

(5) N. R. French & J. C. Steinberg ; Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds, J. A. S. A., 12. 90 (1947)

(6) 三浦種敏 ; 通話品質, 通信工学講座 共出版 (1955)

第2章

- (1) A. H. Inglis, B. S. T. J., 17 394 1938
- (2) 第1章 (4) と同じ

第3章

- (1) 第1章 (6) と同じ
- (2) 橋本・斎藤・松田, "PCM 通信方式における量子化雑音の通話品質的評価"

- (3) B. Smith ; Instantaneous Companding of Quantized Signals , B.S.T.J.
36, No.3 p. 653 , 1957
- (4) 橋本・斎藤・松田 ; 符号変調通信方式の通話品質について , 昭39秋音響学会
- (5) 熊谷他 ; 実験用近距離 PCM 方式の伝送特性について , 通研研究実用化報告 Vol. 13 , No.12 p. 1 1964
- (6) 橋本・斎藤 ; 符号変調通信方式における圧伸特性の通話品質におよぼす影響 , 昭40秋音響学会
- (7) 橋本・斎藤 ; 符号変調通信方式における過負荷ひずみの通話品質評価について , 昭41秋音響学会
- (8) 大森 ; 波形ひずみに関する考察 , 通研成果報告才 2894号, 1966.6
- (9) 橋本・斎藤 ; 音声振幅の部分量子化が通話品質におよぼす影響 , 昭41春音響学会
- (10) 橋本・斎藤 ; 圧伸特性の誤整合による波形歪の品質評価 , 昭41, 電気通信学会全国大会 127. (昭41. 秋)
- (11) J.R. B. Whittlesey ; Incomplete Gamma Functions for Evaluating Erlang Process Probabilities , Mathematics of Computation Vol.17 No.81 p. 11 1963

才4章

- (1) 橋本・斎藤 ; PCM通信方式の通話品質 , 信学誌 Vol.52-A No.8 Aug. 1969

- (2) 橋本・斎藤 ; 符号変調通信方式の通話品質, 通信学会電気音響研究会資料
昭40.10
- (3) 才3章 (4) と同じ
- (4) 才3章 (2) と同じ
- (5) 橋本・斎藤 ; 符号変調通信方式における多リンフ接続の通話品質におよぼす影響 昭41 電四連大 902

才5章

- (1) 橋本・斎藤・前田 ; 量子化音声の電力スペクトラムの評価, 日本音響学会.
昭41.11
- (2) W.R. Bennett ; Spectra of Quantized Signals, B.S.T.J., 27, p. 446, 1948
- (3) A.I. Velichkin ; Amplitude Clipping of Speech, Sov. Physics - Acous. 8 [2] p. 130, 1962
- (4) A.I. Velichkin ; Correlation Function and Spectral Density of Quantized Speech, Sov. Physics - Acous. 9 [1] p. 10, 1963
- (5) A.V. Rimskii-korsakov ; Statistical Properties of a Radio Broadcast Signal, Sov. Ph.-Ac. Vol.6, p.360

才6章

- (1) W.P. Tanner, Jr. and J.A. Swets ; Trans IRE PGIT-4 213
1954
- (2) S. Saito ; Reports of ECL, NTT Vol.7 No.6 June. 1959

- (3) T. Marril ; MIT Tech. Rept. No.319 Oct. 1956
- (4) F. R. Clarke ; J. A. S. A 22, 715 (1957)
- (5) 橋本・斎藤・足達 ; 日本語音節の量子化のずれによる異聴特性, 昭43
電気四学会連大 2550 1968.4
- (6) Chiba & Kajiyama; The Vowel, its nature and structure, Ph. Soc of Japan 1958, p.126
- (7) 服部四郎; 音声学, 岩波書店 1951 p.71

オ7章

- (1) CCITT Red-Book 1st Plenary Assembly ; genever 1956 SG.12
Question 4 Annex.2 , CCITT, 1956
- (2) L. Thurstone ; A Law of comparative judgment, Psychological Rev. 34
p. 273, 1927
- (3) 橋本・斎藤 ; PCM通信方式方式における歪の主観評価について 昭41年音響学会
159 昭41.5
- (4) J. E. Thomson ; A pseudo-random quantizer for TV signals, PIEEE
Vol.55 No.3 p. 353, 1967

オ8章

- (1) 斎藤・橋本(新) ; 音声伝送の基本条件, 信学誌 Vol.51, No.11 p.1412, Nov. 1968
- (2) オ4章 (1) と同じ
- (3) オ3章 (4) と同じ

付 録 1

母 音 異 聴 表

内 容

付 1.1	直通系	雑音	0 mV	系利得	-25 dB
	直通系	雑音	2 mV		"
	直通系	雑音	5 mV		"
	直通系	雑音	10 mV		"
付 1.2	PCM系	7 ビット	$\mu = 150$		"
	PCM系	5 ビット	$\mu = 150$		"
	PCM系	3 ビット	$\mu = 150$		"
	PCM系	7 ビット	$\mu = 0$		"
付 1.3	PCM系	5 ビット	$\mu = 0$		"
	PCM系	3 ビット	$\mu = 0$		"
	直通系	雑音	0 mV	系利得	-39 dB
	直通系	雑音	2 mV		"
付 1.4	直通系	雑音	5 mV		"
	直通系	雑音	10 mV		"
	PCM系	7 ビット	$\mu = 150$		"
	PCM系	5 ビット	$\mu = 150$		"
付 1.5	PCM系	3 ビット	$\mu = 150$		"
	PCM系	7 ビット	$\mu = 0$		"
	PCM系	5 ビット	$\mu = 0$		"
	PCM系	3 ビット	$\mu = 0$		"

註： 略号 V は 母音明りょう度 (%)

付 1.1

直通系 雑音 0 mV

系列得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	100						12.00
e		100					13.00
a			100				26.00
o				100			25.00
u	0.4				99.6		24.00

$$V = 99.9$$

直通系 雑音 2 mV

系列得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	100						12.00
e		100					13.00
a			100				26.00
o				100			25.00
u	0.7				99.3		24.00

$$V = 99.8$$

直通系 雑音 5 mV

系列得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	98.6				1.4		12.00
e		94.2		5.8			13.00
a			99.0	1.0			26.00
o		3.7		96.3			25.00
u	15.2	0.7			84.1		24.00

$$V = 94.1$$

直通系 雑音 10 mV

系列得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	88.7				11.3		12.00
e		70.1	0.7	27.3	1.9		13.00
a	0.7	2.0	89.8	6.5	1.0		26.00
o		5.2	1.9	92.6	0.3		25.00
u	31.7	1.1		0.3	66.9		24.00

$$V = 82.5$$

付 1.2

PCM系 7ビット $\mu=150$ 系利得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	100						12.00
e		100					13.00
a			99.7	0.3			26.00
o				100			25.00
u					100		24.00

$$V=99.9$$

PCM系 5ビット $\mu=150$ 系利得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	100						12.00
e		100					13.00
a			100				26.00
o				100			25.00
u					100		24.00

$$V=100$$

PCM系 3ビット $\mu=150$ 系利得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	95.8				4.2		12.00
e		99.4		0.6			13.00
a			100				26.00
o		0.3		99.7			25.00
u	2.8				97.2		24.00

$$V=98.7$$

PCM系 7ビット $\mu=0$ 系利得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	100						12.00
e		100					13.00
a			99.7	0.3			26.00
o				100			25.00
u					100		24.00

$$V=99.9$$

付 1.3

PCM系 5ビット $\mu = 0$ 系利得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	100						12.00
e		100					13.00
a			99.0		1.0		26.00
o				100			25.00
u	1.7				98.3		24.00

V = 99.3

PCM系 3ビット $\mu = 0$ 系利得 -25 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	96.5				3.5		12.00
e		97.4		2.6			13.00
a			99.4	0.6			26.00
o		1.0		99.0			25.00
u	1.1	1.0			97.9		24.00

V = 98.3

直通系 雑音 0 mV 系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	97.3						12.00
e		98.7		1.3			13.00
a			100				26.00
o				100			25.00
u	3.9				96.1		24.00

V = 98.5

直通系 雑音 2 mV 系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	98.6				1.4		12.00
e		99.4		0.6			13.00
a			99.4	0.6			26.00
o		0.3		99.7			25.00
u	4.2	0.7			95.1		24.00

V = 98.3

付 1.4

直通系 雑音 5 mV

系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	90.5				9.5		12.00
e		84.6	1.9	12.8	0.7		13.00
a		0.3	96.1	3.3	0.3		26.00
o		2.0	0.6	96.7	0.7		25.00
u	21.0	0.7	0.4		77.9		24.00

V = 89.8

直通系 雑音 10 mV

系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	90.3	0.7			9.0		12.00
e		78.9		20.5	0.6		13.00
a			92.6	6.4	1.0		26.00
o		7.0		93.0			25.00
u	32.3	0.7			67.0		24.00

V = 85.0

PCM系 7ビット $\mu=150$ 系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	95.8		0.7		3.5		12.00
e		99.4		0.6			13.00
a			99.4	0.3	0.3		26.00
o		0.3	0.3	98.7	0.7		25.00
u	3.1				96.9		24.00

V = 98.2

PCM系 5ビット $\mu=150$ 系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	96.5				3.5		12.00
e		100					13.00
a			99.7	0.3			26.00
o				100			25.00
u	1.3		0.4	0.4	97.9		24.00

V = 98.6

付 1.5

PCM系 3ビット $\mu=150$ 系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	77.8				22.2		12.00
e		75.0		25.0			13.00
a			99.4		0.6		26.00
o		8.3		91.7			25.00
u	3.1				96.9		24.00

 $V = 95.3$ PCM系 7ビット $\mu=0$ 系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	99.3				0.7		12.00
e		99.4		0.6			13.00
a			99.4	0.6			26.00
o				100			25.00
u	2.1				97.9		24.00

 $V = 99.2$ PCM系 5ビット $\mu=0$ 系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	99.3				0.7		12.00
e		98.7		1.3			13.00
a			99.7	0.3			26.00
o				100			25.00
u	1.0				99.0		24.00

 $V = 99.4$ PCM系 3ビット $\mu=0$ 系利得 -39 dB

S \ R	i	e	a	o	u	.	freq.
i	87.5				12.5		12.00
e		96.1		3.9			13.00
a			100				26.00
o				100			25.00
u	2.4				97.6		24.00

 $V = 97.4$

付 録 2

子 音 異 聴 表

内 容

付 2.1	直通系	雑音 0 mV	系利得	-25 dB
付 2.2	直通系	雑音 2 mV		〃
付 2.3	直通系	雑音 5 mV		〃
付 2.4	直通系	雑音 10 mV		〃
付 2.5	PCM系	7 ビット $\mu = 150$		〃
付 2.6	PCM系	5 ビット $\mu = 150$		〃
付 2.7	PCM系	3 ビット $\mu = 150$		〃
付 2.8	PCM系	7 ビット $\mu = 0$		〃
付 2.9	PCM系	5 ビット $\mu = 0$		〃
付 2.10	PCM系	3 ビット $\mu = 0$		〃
付 2.11	直通系	雑音 0 mV	系利得	-32 dB
付 2.12	直通系	雑音 2 mV		〃
付 2.13	直通系	雑音 5 mV		〃
付 2.14	直通系	雑音 10 mV		〃
付 2.15	PCM系	7 ビット $\mu = 150$		〃
付 2.16	PCM系	5 ビット $\mu = 150$		〃
付 2.17	PCM系	3 ビット $\mu = 150$		〃
付 2.18	PCM系	7 ビット $\mu = 0$		〃
付 2.19	PCM系	5 ビット $\mu = 0$		〃
付 2.20	PCM系	3 ビット $\mu = 0$		〃

註： 略号 S は 音節 明りょう度 (%)

略号 s は 単音 明りょう度 (%)

略号 c は 子音 明りょう度 (%)

付 2.1

直通系 雑音 0 mV

系利得 -25 dB

S ^R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tj	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	85.0	5.0	3.3			5.0						1.7																5.00
t	28	97.2																										3.00
k	6.6	1.7	91.7																									5.00
ts	8.3			75.0	16.7																							1.00
s		4.1		4.2	91.7																							4.00
h		1.7				95.0			3.3																			5.00
pj							94.4														5.6							3.00
kj								83.3	13.9		2.8																	3.00
tj			2.1					4.1	87.5	2.1	2.1		2.1															4.00
f									14.6	83.3	2.1																	4.00
hj		2.8							11.1	25.0	61.1																	3.00
b	6.7											81.7	3.3	3.3		1.7										3.3	5.00	
d			2.8										83.3			11.1										2.8	3.00	
g	1.7		3.3			1.7						5.0		83.3		1.6						1.7				1.7	5.00	
dz			2.1										8.3	2.1	83.3	2.1						2.1						4.00
r												1.6	15.0			80.0				1.7						1.7	5.00	
w																	100.0											1.00
j																		100.0										3.00
m																			98.3	1.7								5.00
n																			3.3	96.7								5.00
bj							2.8														88.9		2.8	5.5				3.00
gj							2.8	2.8	2.8													50.0	27.3	11.1				3.00
d3								2.1	14.5													2.1	79.2					4.00
rj																												
mj																					22.2	5.6	2.8	69.4				3.00
nj																									88.9	11.1		3.00
.																										13.9	83.3	9.00
																				1.7							93.3	5.00

S = 86.2

S = 93.1

c = 86.3

付 2.2

直通系 雑音 2 mV

系利得 -25 dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	•	freq.
P	64.9	8.8	14.0		2.5	2.5			1.8			3.5																5.00
t	19.5	66.7	8.3		5.5																							3.00
k	11.7		73.3			8.3			5.0					1.7														5.00
ts	8.3		8.3	58.4		25.0																						1.00
s	6.2	18.7	7.3	14.6	45.9	6.2																						4.00
h	18.3	1.7	19.3			58.3			3.3																			5.00
pj							61.1	16.7	8.3	2.8								2.8				5.5	2.8					3.00
kj							5.6	55.5	25.0	8.3	5.6																	3.00
tf	4.2		6.2					20.8	60.4	4.2	4.2																	4.00
f		2.0				6.3		10.4	31.3	37.5	12.5																	4.00
hj		5.6						27.8	33.3	19.4	13.9																	3.00
b	3.3											78.3	5.0			16.0							1.7				1.7	5.00
d		2.8										5.6	83.3			8.3												3.00
g	3.3		1.7			1.7						6.7	6.7	68.3	1.7	6.7							3.2					5.00
dz		4.2			2.0							4.2	6.3	2.0	72.9	4.2							4.2					4.00
r	1.7								1.7			13.3	18.3	6.7	9.3	50.0											5.0	5.00
w																	100.0											1.00
j												2.8							77.8							19.4		3.00
m																				75.0	25.0							5.00
n																				5.0	95.0							5.00
bj							2.8												2.8			44.4	8.3	16.7	25.0			3.00
gj								5.6	5.5										2.8			2.8	36.1	38.4	8.3			3.00
d3					2.0			4.2	8.3		2.0			6.3	4.2			2.1			2.1	4.2	58.3	6.3				4.00
rj							2.8												5.5			19.5	5.6	8.3	55.5		2.8	3.00
mj																			5.6						36.1	58.3		3.00
nj																			2.8						5.6	91.6		3.00
•	1.7					1.6										1.7											95.0	5.00

S = 64.4 s = 82.2 c = 64.6

付 2.3

直通系 雑音 5 mV

系利得 -25 dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	•	freq.
P	26.7	18.3	18.3	3.3		13.3			10.0	3.4			3.4	3.3														5.00
t	22.2	58.3	8.4			8.3						2.8																3.00
k	15.0	10.0	43.3	3.3	3.3	11.7			3.3	1.7				6.7		1.7												5.00
ts				33.4	8.3			8.3	50.0																			1.00
s	6.2	43.8	10.4	10.4	14.6	2.1		2.1	8.3						2.1													4.00
h	11.7	1.7	23.3	1.6	1.6	45.0		1.7	1.7			1.7			1.7	1.7							3.3			3.3	5.00	
pj						2.8	5.5	33.3	27.8	5.5				2.8		2.8						5.6	11.1					3.00
kj		11.1		2.8			5.6	8.3	55.5	5.6	11.1																	3.00
tf	4.2		14.6	4.2			6.2	10.4	41.7	8.3	6.2				2.1								2.1					4.00
f	4.2	2.1	8.3		2.1	2.1		10.4	50.0	14.6													6.2					4.00
hj	2.8	2.8	8.3	2.8	2.8	2.8		13.9	41.6	11.1	8.3							2.8										3.00
b	5.0					1.7						53.3	6.7	13.3	1.7	11.6				3.3				1.7		1.7	5.00	
d	2.8											19.4	55.5		2.8	13.9	2.8			2.8								3.00
g	3.3		3.3	3.3		1.6			1.7	1.7		20.0	5.0	35.0	5.0	6.7	3.3		1.7				5.0	1.7		1.7	5.00	
dz	2.1		4.2							2.1		2.1	20.8	6.2	33.3	12.5	4.2			2.1			6.2			4.2	4.00	
r	1.7								1.7		1.7	15.0	19.8	6.7	1.7	40.0			1.7				5.0	3.3		1.7	5.00	
w												8.3				33.3	57.4											1.00
j												2.8						36.1	5.5	16.7			2.8	2.8		33.3	3.00	
m																			60.0	38.3						1.7	5.00	
n											1.6							1.7	35.0	60.0						1.7	5.00	
bj							2.8											13.9	5.5	5.5	8.3	11.1	16.7	25.0		5.6	5.6	3.00
gj							2.8	2.8	5.5				5.5	5.6	2.8						2.8	22.2	41.7	8.3				3.00
d3		2.1	2.1			2.1	2.1	6.2	2.1				14.5	2.1	2.1		2.1					4.2	50.0	6.2			2.1	4.00
rj							5.4							2.7		5.4	2.7	16.2			8.1	13.5		40.6			5.4	3.00
mj																		2.8	11.1	11.1					22.2	52.8		3.00
nj																		2.8	11.1	11.1					11.1	63.9		3.00
•	1.7					1.7						5.0	1.7	1.7		8.3		3.3									76.6	5.00

S = 38.0 s = 66.7 c = 39.2

付 2.4

直通系 雑音 10 mV

系列得 -25 dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	22.3	10.0	23.3		1.7	16.7			8.3	1.7		1.7		3.3		1.7						1.7	3.3				3.3	5.00
t	11.1	52.8	19.4			11.1						2.8															2.8	3.00
k	11.7	11.7	43.3	1.6	1.7	13.3	1.7	1.7	8.3					1.7		3.3												5.00
ts	8.3		8.4		8.3	8.3		8.3	41.7		8.3												8.4					1.00
s	2.1	33.3	18.7	4.2	8.3	4.2			6.2			2.1	8.3	4.2	2.1	6.3												4.00
h	20.0	6.7	28.2	1.7		28.2	1.7		5.0	1.7		1.7		1.7		1.7							1.7					5.00
pj		2.8	8.3				13.9	27.8	19.4		2.8			2.8							2.8		19.4					3.00
kj	11.1	11.1		2.8	2.8			13.9	44.4	5.5				2.8				2.8					2.8					3.00
tf	6.2	6.2	12.5	6.2		2.1	2.1	6.2	35.4	12.5			2.1	2.1		2.1							2.1			2.1		4.00
f	4.2	6.2	14.6	6.2	2.1	2.1	6.2	8.3	31.3	6.2							2.1						6.3			4.2		4.00
hj		16.7	16.7		5.5	2.8		11.1	19.4	8.3					2.8	2.8	2.8					2.8	2.8	5.5				3.00
b	1.7		1.7				1.7					36.7	10.0	15.0	3.3	13.3	3.3		5.0	1.6		1.7	1.7	3.3				5.00
d	2.8											25.0	38.9	8.3		16.7		5.5				2.8						3.00
g			1.7			3.3			3.3			8.3	11.7	26.7	3.3	25.0	1.7		1.7			1.7	3.3	3.3			5.0	5.00
dz	4.1	4.2	2.1		2.1				2.1		2.1	8.3	12.5	18.7	14.6	6.2	2.1	6.2		2.1	2.1		2.1	4.2		4.2		4.00
r			1.7			1.7	1.6					10.0	25.0	15.0	1.7	25.0			3.3	5.0		1.6	1.7	1.7			5.0	5.00
w												8.4	16.7			8.3	25.0	25.0					8.3	8.3				1.00
j			2.8						2.8			2.8				5.5		36.1	8.3	19.4	2.8			5.6		13.9		3.00
m												1.7							65.0	30.0					1.6	1.7		5.00
n															1.7				36.7	58.3						3.3		5.00
bj							2.8	2.8	5.5				5.5			2.8	2.8	13.9	2.8	2.8	2.8	8.3	5.5	25.0	2.8	13.9		3.00
gj						2.8	5.5	2.8	5.5				5.5		2.8	5.5		2.8	2.8	2.8		13.9	30.6	13.9			2.8	3.00
d3	4.2		10.4		2.1	4.2	2.1		2.1	2.1		6.2		8.3	6.2	10.4		4.2				8.3	12.5	12.5		2.1	2.1	4.00
rj					2.8		5.6							5.5		5.5		16.7	2.8	2.8	16.7	2.8	5.5	25.0		2.8	5.5	3.00
mj																		5.6	11.1	27.8	2.8				8.3	44.4		3.00
nj												2.8						16.7	11.1							61.4		3.00
.	1.7		1.7			3.3						1.7	1.7	1.7		8.3			3.3	1.7			1.7	1.6			71.6	5.00

$$S = 26.4 \quad s = 56.9 \quad c = 31.3$$

付 2.5

PCM系 7ビット $\mu=150$ 系列得 -25 dB

S ^R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	91.7	3.3	1.7			3.3																						5.00
t	2.8	94.4	2.8																									3.00
k	1.7		95.0			3.3																						5.00
ts				100.0																								1.00
s		20.8	2.1	6.3	70.8																							4.00
h			3.3			90.9			3.3	1.7													1.7					5.00
pj							91.7	5.5														2.8						3.00
kj								69.4	27.8		2.8																	4.00
tf								8.3	79.2	8.3	4.2																	4.00
f					2.1				12.5	85.4																		4.00
hj								16.7	19.4	19.4	41.7												2.8					3.00
b	5.0											90.0	3.3			1.7												5.00
d		5.5										5.6	88.9															3.00
g			5.0									3.3	1.7	83.3		1.7						5.0						5.00
dz	2.1				2.1							2.1	12.5		72.9	8.3												4.00
r												5.0	31.7			63.3												5.00
w																	100.0											1.00
j																		91.7						2.8		5.5		3.00
m																			90.0	10.0								5.00
n																			8.3	91.7								5.00
bj																					80.5	5.6	8.3	5.6				3.00
gj								8.3													2.8	41.7	44.4	2.8				3.00
d3								2.1						2.1							2.1		93.7					4.00
rj																					2.8		25.0	2.8	2.8	66.6		3.00
mj																									66.6	33.3		3.00
nj																									13.9	86.1		3.00
.																										100.0		5.00

 $S=82.3$ $s=91.3$ $c=82.7$

付 2.6

PCM系 5ビット

 $\mu = 150$

系利得 -25dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	73.2	6.7	6.7	1.7		3.3			1.7	1.7		5.0																5.0
t	5.6	94.4																										3.0
k			96.7						3.3																			5.0
ts	8.3			83.4	8.3																							1.0
s		29.2		18.8	45.7	2.1						2.1	2.1															4.0
h	1.7		1.7			86.6			5.0	5.0																		5.0
pj							75.0	2.8	19.4													2.8						3.0
kj								72.2	25.0														2.8					3.0
tf			2.1					6.3	83.2	6.3	2.1																	4.0
f			2.1			4.2			14.6	72.8	6.3																	4.0
hj								8.3	22.2	18.4	51.1																	3.0
b	1.7											88.3	6.7			3.3												5.0
d													97.2			2.8												3.0
g			10.0			3.3								83.4								3.3						5.0
dz					2.1							10.4		87.5														4.0
r												11.7	36.7	1.7		49.9												5.0
w																	100.0											1.0
j																		97.2								2.8		3.0
m																			81.7	18.3								5.0
n																			11.7	88.3								5.0
bj								2.8													61.0		5.6	30.6				3.0
gj								2.8													5.6	53.5	25.0	11.1				3.0
d3								2.1	8.3				4.2									85.4						4.0
rj							2.8	2.8													16.7	2.8	5.6	69.3				3.0
mj																		5.6							61.1	33.3		3.0
nj																		8.3							8.3	83.4		3.0
.												3.3										1.7				95.0		5.0

 $S = 78.6$ $s = 89.3$ $c = 78.7$

付 2.7

PCM 系 3ビット $\mu=150$ 系利得 -25 dB

S ^R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	63.4	13.3	8.3	1.7		10.0			3.3																			5.0
t	2.8	88.9	8.3																									3.0
k	5.0	1.7	81.5		1.7	1.7			6.7							1.7												5.0
ts			8.3	41.8	25.0		8.3			8.3					8.3													1.0
s		10.4		6.3	64.5	8.3			6.3	2.1	2.1																	4.0
h	1.7		1.7	1.7		84.8			1.7	3.3	1.7												1.7			1.7		5.0
pj			2.8				55.5	33.3	2.8		2.8											2.8						3.0
kj								63.9	33.3		2.8																	3.0
tf			2.1					12.5	75.0	8.3	2.1																	4.0
f						4.2			10.4	77.1	8.3																	4.0
hj	2.8	5.6							19.4	36.1	33.3												2.8					3.0
b	3.3					1.7	1.7					63.1	3.3	1.7	1.7	18.3	1.7		1.7							1.7		5.0
d												11.1	75.0	2.8	2.8	8.3												3.0
g			1.7									5.0	1.7	69.9	3.3	5.0					1.7		11.7					5.0
dz		2.1				8.3			2.1		2.1	2.1		2.1	68.7	4.2							6.3	2.1				4.0
r												8.2	29.0	3.3	5.0	51.2						2.3						5.0
w												16.7					83.3											1.0
j																		55.5		16.7						27.8		3.0
m																			51.6	41.7						1.7		5.0
n																1.7		1.7	23.0	73.6								5.0
bj																					45.8	2.8	11.4	34.4		2.8		3.0
gj								8.3														5.6		19.4	58.4	8.3		3.0
d3									6.3													2.1		91.6				1.0
rj												2.8					2.8					13.9	5.6	13.9	58.2			3.0
mj																			5.6	2.8					16.7	74.9		3.0
nj																			5.6		2.8			10.8	80.8			3.0
.																				1.7							98.3	5.0

S = 65.8 s = 82.6 c = 66.4

付 2.8

PCM系 7ビット $\mu=0$ 系利得 -25 dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	81.7	11.7	1.7			3.3						1.6																5.00
t	5.6	94.4																										3.00
k	1.7		93.3						5.0																			5.00
ts				11.7	41.7	16.6																						1.00
s	2.1	10.4		6.2	81.3																							4.00
h	1.7		1.7			90.0				5.0																1.6		5.00
pj							94.4	2.8																	2.8			3.00
kj							2.8	63.9	27.7													2.8	2.8					3.00
tf					2.1			10.4	81.2	4.2													2.1					4.00
f									10.4	87.5	2.1																	4.00
hj								11.1	16.7	22.2	50.0																	2.00
b	5.0											85.0	3.3		1.7		1.7									3.3		5.00
d		5.6											83.3			11.1												3.00
g			1.7									1.7	1.7	91.6	1.6											1.7		5.00
dz					6.2									2.1	87.5	4.2												4.00
r												6.6	26.7			65.0										1.7		5.00
w																	100.0											1.00
j																		94.4						2.8	2.8			3.00
m																			95.0	5.0								5.00
n																			1.7	98.3								5.00
bj																					80.5	2.8		19.9				3.00
gj								2.8	2.8										8.3		5.5	50.0	25.0	5.6				3.00
d3								2.1	4.2													6.2	87.5					4.00
rj																					27.8	2.8		69.4				3.00
mj																									75.0	25.0		3.00
nj																			2.8						2.8	94.4		3.00
.																										100.0		5.00

S = 83.3 s = 91.9 c = 83.8

付 2.9

PCM系 5ビット $\mu=0$ 系利得 -25dB

S/R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	80.0	6.6	6.7			6.7																						5.00
t		100.0																										3.00
k			95.0			3.3			1.7																			5.00
ts			8.3	83.4											8.3													1.00
s	2.1	6.2		12.5	77.1										2.1													4.00
h	1.7	1.7				93.3			3.3																			5.00
pj							88.9	11.1																				3.00
kj								80.5	16.7		2.8																	3.00
tf			4.2			2.1		20.8	66.7	4.1													2.1					4.00
f									4.1	91.7	4.2																	4.00
hj								8.3	8.3	25.0	55.5				2.8													3.00
b	11.7		1.7									78.3	1.7	1.7		3.3										1.7	5.00	
d		8.3											83.4			8.3												3.00
g			6.6											91.7									1.7					5.00
dz				2.1	2.1								6.2	2.1	85.4	2.1												4.00
r	3.3											5.0	20.0		3.3	68.4												5.00
w																	100.0											1.00
j							2.8												94.4			2.8						3.00
m																				88.3	11.7							5.00
n																				10.0	90.0							5.00
bj																						91.7		2.8	5.5			3.00
gj							2.8	16.7											2.8			2.8	41.6	27.8	5.5			3.00
d3								4.2	12.5														81.2				2.1	4.00
rj																			2.8			22.2	2.8	2.8	69.4			3.00
mj																			2.8						2.8	52.8	41.6	3.00
nj																			8.3						22.2	69.5		3.00
.	1.7															3.3											35.0	5.00

S=81.6 s=90.8 c=81.8

付 2.10

PCM系 3ビット $\mu=0$ 系利得 -25dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	78.3	6.6	10.0			1.7	1.7							1.7														5.00
t	2.8	82.3	8.3		2.8								2.8															3.00
k	1.7	1.7	88.3			1.7			6.6																			5.00
ts			33.3	50.0					16.7																			1.00
s		2.1			91.6					6.3																		4.00
h						91.7				8.3																		5.00
pj							91.6	2.8	2.8												2.8							3.00
kj							5.5	61.1	27.8	2.8	2.8																	3.00
tf			6.3				2.1	18.7	72.9																			4.00
f										100.0																		4.00
hj									2.8	80.6	16.6																	3.00
b	1.7		1.7						1.7			75.0	10.0	1.7		5.0			1.6				1.6					5.00
d												5.5	84.1	2.8	2.8	2.8												3.00
g			1.6									8.3	3.3	68.3	1.7	11.7	1.7						1.7				1.7	5.00
dz			2.1									10.4	16.7	18.8	43.7	6.2							2.1					4.00
r												18.3	35.0			45.0												5.00
w																	100.0											1.00
j																		41.7	2.8	2.8					5.5	47.2		3.00
m																			75.0	23.3						1.7		5.00
n																			13.3	81.7						5.0		5.00
bj							8.3								5.5			2.8			38.9	16.7	13.9	13.9				3.00
gj							5.5							2.8	2.8			2.8			5.6	44.4	38.5	5.6				3.00
d3			4.1				8.3	2.1				2.1			2.1	2.1					4.2	10.4	62.5	2.1				4.00
rj																		5.6			25.0	8.3	13.9	41.7		5.5		3.00
mj																									61.1	33.1		3.00
nj																		5.5		2.8					25.0	66.7		3.00
.			1.7																3.3	5.0						90.0		5.00

$$S = 66.4 \quad s = 84.6 \quad c = 70.3$$

付 2.11

直通系 雑音 0 mV

系利得 -32 dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tj	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	88.3	3.3	1.7		1.7	1.7						3.3																5.00
t	8.3	86.1	2.8			2.8																						3.00
k	5.0	1.7	76.6			6.7			5.0	3.3				1.7														5.00
ts				75.0	16.7	8.3																						1.00
s		25.0		12.5	62.5																							4.00
h	3.3	1.7	3.3			85.0			3.3	1.7		1.7																5.00
pj							91.6	2.8													2.8	2.8						3.00
kj								72.2	16.7	5.5	2.8												2.8					3.00
tj			2.1		4.2			8.3	72.9	6.2	4.2												2.1					4.00
f			4.2						8.3	81.5																		4.00
hj								5.5	22.2	16.7	55.6																	3.00
b	3.4											88.3	3.3			5.0												5.00
d		2.8											80.5	2.8	2.8	11.1												3.00
g			1.7									5.0	5.0	81.6	1.7	3.3						1.7						5.00
dz				4.2								2.1	6.2	2.1	75.0	10.4												4.00
r	1.7											1.7	25.0	3.3		63.3								1.7		3.3		5.00
w																	100.6											1.00
j																		91.6			2.8			2.8		2.8		3.00
m	1.7											1.7							96.0	5.0						1.6		5.00
n																				6.7	93.3							5.00
bj																						72.2		2.8	25.0			3.00
gj							2.8	5.5	2.8		2.8								8.3			2.8	38.9	30.6	5.5			3.00
d3									10.4		2.1			2.1					4.2			2.1	6.2	72.9				4.00
rj							2.8												8.3			19.4	5.6	8.3	55.6			3.00
mj																						2.8			77.8	17.4		3.00
nj																						2.8			8.3	83.9		3.00
.																3.3											96.7	5.00

$$S = 79.0 \quad s = 89.6 \quad c = 79.1$$

付 2.12

直通系 雑音 2mV

系利得 -32dB

S ^R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	48.2	10.0	18.3		5.0				1.7			6.7				1.7			1.7									5.00
t	8.3	52.8	16.7		11.1	8.3							2.8															3.00
k	8.3	1.7	75.0			6.6			5.0	1.7				1.7														1.00
ts	8.3		8.3	41.7	16.7	16.7			8.3																			1.00
s	2.1	25.0	4.2	14.6	45.8	6.2				2.1																		4.00
h	6.7	6.7	26.6			44.9			5.0					1.7	1.7											1.7		5.00
pj							52.8	11.1	11.1		8.3							2.8				11.1	2.8					3.00
kj								41.7	44.4		11.1							2.8										3.00
tf								10.4	70.8	6.3	10.4												2.1					4.00
f	2.1		2.1		2.1	2.1	2.1	10.4	45.8	27.1	6.2																	4.00
hj								27.8	36.1	8.3	16.6				2.8								2.8	5.6				3.00
b	4.9			1.7	1.7							70.0	1.7	10.0		10.0												5.00
d									2.8			2.8	63.8	11.1	5.6	8.3				5.6								3.00
g		1.7	10.0	1.7		1.7			5.0			5.0	5.0	58.1	5.0	1.7			1.7		1.7					1.7		5.00
dz				6.3		2.1				2.1		2.1	14.6	2.1	66.5	2.1				2.1				3.3				4.00
r	3.3			1.7								10.0	33.3	6.6		35.0	1.7	1.7	1.7	1.7								5.00
w																	100.0											1.00
j								5.6			2.8							66.6		2.8	2.8	8.3		2.8		8.3		3.00
m	3.3															1.7			70.0	23.3						1.7		5.00
n	1.7	1.7																	15.0	78.2					1.7	1.7		5.00
bj							8.3		2.7									2.8			30.6	5.6	11.0	33.3		5.6		3.00
gj							5.6	13.9			2.8							5.6				22.2	30.6	13.3				3.00
d3					2.1	4.2		11.3	2.1		2.1		4.2	1.2	4.2		4.2				2.1	2.1	54.1	2.1				4.00
rj							11.1	2.8			2.8					11.1					19.4	19.4	8.4	25.0				3.00
mj																		8.3			2.8				19.4	69.5		3.00
nj																		5.6		2.8					8.3	83.3		3.00
.			5.0									1.7							1.7								91.6	5.00

S = 55.7 s = 77.4 c = 55.1

付 2.13

直通系 雑音 5 mV

系利得 -32 dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	33.3	8.3	23.3	1.7	1.7	25.0				1.7				3.3													1.7	5.00
t	11.1	69.4	2.1			11.1						2.8		2.8														3.00
k	18.3	8.3	43.3	1.7	1.7	13.3		1.7	1.7	3.3				3.3		1.7											1.7	5.00
ts		8.4	25.0	41.7		8.3				8.3	8.3																	1.00
s	4.2	29.2	6.2	8.3	24.8	10.4				10.4	2.1	2.1	2.1		4.2													4.00
h	11.7	6.7	25.0	1.6	1.6	38.3			1.7	1.7		3.3		3.3					1.7				1.7				1.7	5.00
pj				2.8			13.9	8.3	19.4	13.9	19.4				2.8						2.8	2.8	8.3	2.8			2.8	3.00
kj		2.8			2.8		5.5	16.7	52.8	11.1	5.5			2.8														3.00
tf	6.2	6.2	6.3	2.1		2.1		10.4	41.7	6.2	10.4												4.2	2.1			2.1	4.00
f	8.3	2.1	8.3	2.1	6.3	6.3		10.4	37.5	10.4				2.1									6.2					4.00
hj		11.1	5.5	2.8	2.8			19.4	38.6	13.9	11.1				2.8													3.00
b	8.3			1.7		1.7						46.7	8.3	3.3	1.7	15.0				3.3	5.0			1.7			3.3	5.00
d												5.6	66.6		2.8	19.4							2.8				2.8	3.00
g			1.7	1.7		1.7				3.3		13.3	13.3	40.0	8.3	6.7			1.7	1.7			3.3	3.3				5.00
dz		2.1		2.1								4.2	16.7	6.2	33.3	14.6	2.1	6.2				2.1	8.3	2.1				4.00
r					3.3			3.3		1.7	15.0	13.3	8.3	3.3	26.7	5.0	5.0	5.0	1.7				1.7	1.7			5.0	5.00
w																	100.0											1.00
j									2.8			2.8		2.8	2.8	2.8		33.3	2.8	8.3			11.1	8.3		22.2		3.00
m	3.3											5.0						1.7	60.0	26.7						3.3		5.00
n	3.3							1.7	1.7			5.0			1.6	1.7		1.7	18.3	60.6					1.7	3.3		5.00
bj	2.8			2.8			2.8									2.8		25.0	5.5	8.3	13.9	2.8	8.3	16.7		8.3		3.00
gj							5.5	2.8	8.3		2.8		2.8	5.5		2.8	2.8	2.8			11.1	13.9	33.3	5.6				3.00
d3	2.1				2.1	2.1	2.1	2.1	10.4		4.1			14.6	4.2		2.1	4.1				4.2	27.1	12.5			6.2	4.00
rj			2.8							2.8				2.8				33.3		2.8	11.1	8.3	13.9	19.4		2.8		3.00
mj	2.8						2.8				2.7							2.8		11.1	2.8				19.4	55.5		3.00
nj		2.8						2.8	5.5					2.8					8.3	13.9					11.1	52.8		3.00
.						3.4						5.0	3.3	3.3	1.7	3.3			3.3	6.7		1.7					68.3	5.10

S = 35.7

s = 66.1

c = 37.4

付 2.14

直通系 雑音 10 mV

系列得 -32dB

S ^R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	•	freq.
P	11.7	20.0	23.3	3.3		16.7	1.7	3.3	3.3			3.3		5.0		5.0			1.7				1.7					5.00
t	11.1	33.2	25.0		5.6	5.6					2.8			8.3	2.8				5.6									3.00
k	10.0	16.7	36.7	1.6		20.0		3.3	5.6					3.3	1.7								1.7					5.00
ts		8.3	8.4	16.7	8.4	8.3		8.3	16.7	8.3	8.3	8.3																1.00
s	12.5	31.2	10.4	6.2	12.5	6.3		4.2	8.3	2.1			2.1	2.1				2.1										4.00
h	8.3	6.7	21.7	1.6		33.3	1.6	1.6	6.7	1.7		1.7	1.7	3.3	1.7	1.7			1.7	1.7						3.3	5.00	
pj			5.6			2.8	5.6	8.3	33.3	8.3	8.3			8.3								2.8	11.1	2.8		2.8		3.00
kj	2.8	8.3	11.1		2.8	2.8	2.8	8.3	27.8	5.5	11.1					2.8		2.8				2.8	8.3					3.00
tf	4.2	4.2	12.5	2.1	2.1	8.3		10.4	39.6	6.2	6.2				2.1										2.1			4.00
f	2.1	12.5	14.6	2.1		6.2	4.2	2.0	41.7	8.3	2.1				2.1								2.1					4.00
hj	2.8	5.5	5.6	5.6	2.8	5.5	11.1	22.1	19.4	5.6	8.3						2.8						2.8					3.00
b	3.3	1.6	1.7									30.0	6.7	20.0	1.7	20.0	1.7						3.3	3.3		1.7	5.0	5.00
d	2.8				2.8							16.7	38.3	8.3	2.8	11.1	13.9						2.7					3.00
g	3.3	3.3				3.3		1.7	1.7			29.3	11.7	26.7	5.0	8.3	1.7			1.7		3.3	3.3		1.7			5.00
dz	4.2	2.1	2.1	6.2			4.2	2.1	2.1		2.1	6.2	14.1	8.3	8.3	8.3	4.2	4.2				6.2	4.2	8.3			2.1	4.00
r	1.7						1.7	1.7	1.7	1.7		6.7	15.0	11.7		28.3	5.0	3.3	3.3	1.7	1.6		1.6	3.3		10.0	5.00	
w																8.3	83.4						8.3					1.00
j	2.8				2.8							2.8				5.5		19.4	13.9	16.7	2.7			13.9	2.8	11.7		3.00
m																			(3.3	33.3					1.7	1.7		5.00
n	1.7								1.7										28.3	51.6						16.7		5.00
bj								2.8						2.8		2.8		16.7		11.1	8.3	5.5	5.5	30.6	2.8	11.1		3.00
gj				2.7		2.8	2.8	2.7	2.7			2.8		2.8	2.8	2.8	8.3					13.9	22.2	27.3				3.00
d3	2.1	2.1	2.1	4.2		2.1		2.1	6.2			4.1	12.5	4.2	6.2		4.2	6.2	2.1	2.1	8.3	12.5	12.5			4.2	4.00	
rj							2.8	2.8	2.8			2.8		2.8		8.3	2.8	16.7	2.8	5.5		5.5	5.5	25.0	2.8	8.3	2.8	3.00
mj																		2.8	5.5	30.6					16.7	44.4		3.00
nj																2.8	2.8	25.0	16.7						8.3	44.4		3.00
•	1.7					3.3			1.7	1.6		1.7	1.7	1.7		8.3		1.6		11.0		1.7		5.0			60.0	5.00

$$S = 25.1 \quad s = 55.7 \quad c = 28.2$$

付 2.15

PCM系 7ビット $\mu=150$ 系列得 -32dB

S ^R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	65.0	5.0	10.0	1.7	1.7	10.0						5.0		1.6														5.00
t	11.1	72.2	5.6		11.1																							3.00
k	3.3		75.0			13.4			5.0	3.3																		5.00
ts			8.3	75.0	8.3										8.4													1.00
s	2.1	18.7	12.5	12.5	52.1					2.1																		4.00
h	1.7	3.3	10.0		1.7	78.3				3.3		1.7																5.00
pj							52.8	13.9	11.1	2.8	2.8							2.8			5.5	2.8	2.8	2.8				3.00
kj								47.2	27.8		13.9								2.8			2.8	5.5					3.00
tf			2.1		2.1			14.6	68.7	6.2	6.3																	4.00
f			2.1			2.1		2.1	35.4	54.1	4.2																	4.00
hj		2.8						22.2	16.7	22.2	33.3												2.8					3.00
b	6.6											68.3	5.0	6.7		10.0				1.7						1.7	5.00	
d												2.8	80.5		2.8	13.9												3.00
g	3.3		1.7			1.7						5.0		80.0		1.7	1.7					3.3					1.6	5.00
dz		4.1			2.1	2.1						2.1	22.9		56.2	4.2		2.1	2.1	2.1								4.00
r		1.7							1.7			1.7	20.0	5.0	3.3	63.3										3.3	5.00	
w																	100.0											1.00
j																2.8		83.3				2.8			2.8	8.3		3.00
m	1.7											1.7							85.0	10.0							1.6	5.00
n				1.7															11.7	86.6								5.00
bj							5.5		2.8									11.1			38.9	2.8	11.1	27.8				3.00
gj								11.1	2.8									11.1				27.8	38.9	8.3				3.00
d3								2.1	8.3	2.1				4.2						2.1	4.2	4.2	68.6	4.2				4.00
rj							2.8											8.3			22.2	2.8	16.7	47.2				3.00
mj							2.8		2.8									2.8							27.7	63.9		3.00
nj																		8.3			2.8				11.1	77.8		3.00
.																1.7				1.7							96.6	5.00

S = 66.1 s = 83.1 c = 66.6

付 2.16

PCM系 5ビット $\mu=150$ 系利得 -32dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	55.5	13.1	8.2	1.7		9.8						3.3		1.7													6.7	5.0
t	5.6	83.6	10.8																									3.0
k	5.0		80.0			6.7			3.3			1.7		3.3														5.0
ts			8.3	83.4	8.3																							1.0
s	4.2	33.3		16.7	33.4	2.1								2.1	6.3					2.1								4.0
h	6.7	3.3	22.1			52.8			3.3	1.7				1.7		1.7			1.7				1.7			3.3		5.0
pj							63.8	13.9	11.1		2.8							2.8			2.8	2.8	2.8					3.0
kj								49.9	36.1	5.6	5.6											2.8						3.0
tf		4.2	6.3		2.1	2.1		12.5	52.0	8.3	8.3					2.1							2.1					4.0
f		2.1			2.1	2.1	2.1	2.1	24.9	41.6	16.7	2.1											2.1			2.1		4.0
hj		5.6						13.9	30.5	11.1	25.0		2.8			2.8					2.8	5.6						3.0
b	1.7				1.7							65.0	8.3	5.0		10.0				3.3						5.0		5.0
d		2.8											70.1		2.8	21.5										2.8		3.0
g	1.7		3.3						1.7			6.7	6.7	66.5	1.7	1.7			1.7	3.3		1.7				3.3		5.0
dz	2.1	4.2										2.1	16.7	8.3	56.2	10.4												4.0
r			1.7		1.7				1.7			6.7	26.1	3.3	1.7	48.7			1.7	1.7		3.3				1.7		5.0
w																	100.0											1.0
j																	2.8	74.9					11.1	5.6	2.8	2.8		3.0
m												3.3								83.4	13.3							5.0
n	1.7	1.7	1.7											1.7						18.3	74.9							5.0
bj																		5.6			47.1		11.1	27.8	2.8	5.6		3.0
gj									5.6							2.8		5.6			8.3	25.0	36.0	16.7				3.0
d3								2.1	8.3		2.1	2.1		4.2	2.1	6.3				2.1		62.3	4.2		2.1			4.0
rj									2.8		2.8										30.6		2.8	47.1				3.0
mj																		8.3						2.8	41.7	47.2		3.0
nj											2.8												2.8		8.3	83.3		3.0
.													5.0							5.1			3.3				86.7	5.0

 $S = 60.4$ $s = 80.2$ $c = 60.8$

付 2.17

PCM系 3 ビット $\mu=150$ 系利得 -32 dB

S ^R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	•	freq.
P	43.4	16.7	18.3	9.3		8.3			3.3			5.0				1.7												5.0
t	13.9	75.1	8.3		2.8																							3.0
k	5.0	1.7	73.9	1.7		5.0			3.3					1.7									1.7					5.0
ts	8.3		8.3	50.0	16.7	16.7																						1.0
s	6.3	16.7	6.3	10.4	45.7	12.5									2.1													4.0
h	10.0	1.7	10.0			71.5			1.7	1.7				1.7												1.7		5.0
pj							50.0	27.7	8.3												5.6	5.6	2.8					3.0
kj			2.8		2.8			44.3	30.5	2.8	5.6				2.8							2.8	5.6					3.0
tf	6.3		8.3		4.2	6.3		12.5	47.8	14.6																		4.0
f	2.1	2.1	2.1		2.1	10.4		4.2	22.9	47.8	6.3																	4.0
hj		5.6		2.8	2.8			11.1	30.5	19.4	27.8																	3.0
b	3.3	1.7							1.7			53.2	11.7		3.3	10.0			1.7	1.7			1.7	3.3			6.7	5.0
d		2.8										8.3	72.2			16.7												3.0
g	5.0		6.7	1.7					1.7			5.0	1.7	58.2	3.3	5.0	3.3				1.7		6.7					5.0
dz		10.4			4.2	6.3						10.4	8.3	4.2	47.8	4.2				2.1	2.1							4.0
r			1.7			3.3	1.7					8.3	18.3	8.3	5.0	48.3							1.7			1.7	1.7	5.0
w																8.3	91.7											1.0
j																	2.8	38.8	11.1	16.7	5.6				2.8	2.8	19.4	3.0
m									1.7			1.7							62.2	26.7					1.7			5.0
n						1.7												3.3	21.7	73.3								5.0
bj							2.8							2.8	2.8			2.8			22.2	11.1	25.0	27.7	2.8			3.0
gj								8.3								2.8		11.1				11.1	44.5	19.4		2.8		3.0
d3								6.3						2.1		8.3		6.3		2.1		2.1	64.5	8.3				4.0
rj																		5.6			27.8	2.8	11.1	49.9	2.8			3.0
mj																		2.8	2.8	16.7	2.8				8.3	66.6		3.0
nj																		2.8		13.7					19.4	63.9		3.0
•	3.3					6.7			1.7							1.7			1.7	3.3						81.6		5.0

S=53.4 s=75.9 c=54.4

付 2.18

PCM系 7ビット $\mu=0$

系利得 -32 dB

S ^R	P	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	783	10.0	1.7			10.0																						5.00
t	28	88.9	5.5			28																						3.00
k	33		81.7			10.0			3.3					1.7														5.00
ts	8.3		8.3	50.0	16.7	8.3									8.4													1.00
s	2.1	12.5	8.3	12.5	52.1	2.1							4.2		6.2													4.00
h	3.3	3.3	13.3			71.7			5.0	1.7				1.7														5.00
pj							80.5	11.1	2.8															2.8	2.8			3.00
kj								44.4	41.7	8.3	2.8												2.8					3.00
tf			2.1					10.4	18.7	12.5	2.1												4.2					4.00
f			2.1		2.1	6.2		2.1	25.0	62.5																		4.00
hj								25.0	22.2	13.9	36.1							2.8										3.00
b	1.7											81.6	1.7		3.3	5.0	1.7		1.7							3.3	5.00	
d		2.8											75.0		2.8	16.6				2.8								3.00
g			11.7			5.0								78.3									5.0					5.00
dz					4.2			2.1				2.1	10.4		72.9	6.2		2.1										4.00
r	1.7			1.7								11.7	33.3	6.6		45.0												5.00
w																	100.0											1.00
j																			86.1				8.3			5.6		3.00
m																				85.0	15.0							5.00
n																				83	91.7							5.00
bj							2.8															55.5	2.8	2.8	25.0			3.00
gj								2.8				2.8		2.8					11.1			5.6	33.3	11.1				3.00
d3					2.1		2.1	4.2	2.1				2.1	2.1	2.1	4.1		6.2				6.2	44.6			2.1		4.00
rj							5.6												11.1			8.3	5.6	8.3	61.1			3.00
mj																									56.1	50.0		3.00
nj																					2.8		2.8		2.8	91.6		3.00
.												1.7				3.3											95.0	5.00

S=69.6

s=84.6

c=69.8

付 2.19

PCM系 5ビット $\mu=0$

系利得 -32dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	71.7	8.3	6.6		3.3	1.7			3.3			1.7							1.7								1.7	5.00
t		97.2																									2.8	3.00
k	3.3	1.7	75.0	1.7		11.6			5.0	1.7																		5.00
ts				75.0	25.0																							1.00
s	6.2	8.3	2.1		81.3						2.1																	4.00
h	1.7		1.7		1.7	86.6					6.6								1.7									5.00
pj							80.5	13.9	5.6																			3.00
kj							8.3	55.6	33.3		2.8																	3.00
tf							2.1	14.6	52.1	29.1	2.1																	4.00
f					2.1					97.9																		4.00
hj					2.8		2.8		5.5	55.5	30.6													2.8				3.00
b	15.0								1.7			68.3	5.0	1.7		3.3			1.7								3.3	5.00
d		11.1										2.8	66.6			11.7							2.8					3.00
g			5.0	1.7						1.7		1.7	1.7	80.0		1.6							3.3				3.3	5.00
dz	2.1	8.3		8.3	2.1							2.1	2.1	2.1	70.8	2.1												4.00
r			1.7									3.3	33.4	3.3		58.3												5.00
w																	100.0											1.00
j										2.8									97.2									3.00
m																				88.4	8.3							5.00
n																				11.7	88.3							5.00
bj							5.5												2.8			69.4		2.8	16.7	2.8		3.00
gj								5.5						2.8				5.6			2.8	41.7	36.1	5.5				3.00
d3						2.1	2.1	4.2	10.4	4.1		2.1										8.3	64.6	2.1				4.00
rj																			5.6			30.5	5.6	11.1	47.2			3.00
mj																			5.5	5.6	2.8	2.8			2.8	25.0	55.5	3.00
nj																			8.3						8.3	83.4		3.00
.												1.6				5.0								1.7			90.1	5.00

S=73.6

s=86.8

C=73.8

付 2.20

PCM系 3ビット $\mu=0$

系利得 -32dB

S ^R	p	t	k	ts	s	h	pj	kj	tf	f	hj	b	d	g	dz	r	w	j	m	n	bj	gj	d3	rj	mj	nj	.	freq.
P	70.0	11.7	11.6			3.3						1.7		1.7														5.00
t	5.6	88.0	5.5																									3.00
k	6.7		78.3			3.3			6.7					5.0														5.00
ts	16.7		8.3	50.0	8.3			8.4	8.3																			1.00
s		4.1	2.1	6.2	62.5	4.2			4.2	10.4	2.1	2.1	2.1															4.00
h			1.7			90.0				6.6		1.7																5.00
pj							80.5	5.6	8.3		2.8													2.8				3.00
kj							2.8	55.5	36.1		2.8											2.8						3.00
tf			6.2			2.1	4.2	16.6	62.5	2.1	2.1												4.2					4.00
f										100.0																		4.00
hj								5.6		72.2	22.2																	3.00
b	3.3					1.7						65.0	6.7	8.3		6.7	1.7		3.3							3.3	5.00	
d													88.7	2.8		8.3												3.00
g	3.6	1.7	3.3									11.7	10.0	60.0	1.7	3.3				1.7			3.3					5.00
dz			2.1	4.2								8.3	18.7	20.8	35.4	6.3					2.1	2.1						4.00
r												6.7	33.3	6.7	1.7	43.3	3.3			3.3				1.7				5.00
w																	66.7		33.3									1.00
j																		33.3		11.1				5.6	2.8	47.2		3.00
m	1.7					1.7						1.7							63.3	21.6						8.3	5.00	
n													1.7						13.3	80.0						5.0	5.00	
bj							8.3							2.8							72.2	2.8	2.8	8.3	2.8			3.00
gj									5.6													38.9	44.4	8.3		2.8		3.00
d3								2.1	25.0			4.2		4.2								6.2	56.2	2.1				4.00
rj								2.8											2.8		19.4	16.7	2.8	47.2	2.8	5.5		3.00
mj																		2.8	5.5	8.3					27.8	55.6		3.00
nj																		2.8	5.6	19.4					19.4	52.8		3.00
.												1.6				1.6		1.7	1.7		1.7			1.7		90.0	5.00	

S=57.5

s=80.9

c=64.2